

## ANÁLISE MULTI-INTEGRADA DA CADEIA DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS NO SETOR RODOVIÁRIO

Amanda Pereira Aragão

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Mario Giampietro

Rio de Janeiro

Março de 2018

ANÁLISE MULTI-INTEGRADA DA CADEIA DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS  
NO SETOR RODOVIÁRIO

Amanda Pereira Aragão

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

---

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

---

Prof. Amaro Olimpio Pereira Junior, D.Sc.

---

Prof. David Alves Castelo Branco, D.Sc.

---

Prof. Helder Queiroz Pinto Jr, D.Sc.

---

Dra. Zora Kovacic, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Aragão, Amanda Pereira

Análise multi-integrada da cadeia de combustíveis líquidos no setor rodoviário / Amanda Pereira Aragão. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIV, 145 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Mario Giampietro

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 125-133.

1. Bioeconomia da energia. 2. Análise Multi integrada  
3. MuSIASEM. I. Szklo, Alexandre Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Com todo amor a minha família e amigos

*“...os limites de toda ciência na realidade são penumbras movediças. A física se confunde com a química, e esta com a biologia, a economia com a ciência política e com a sociologia e assim sucessivamente; existe uma química física, uma bioquímica e incluso uma economia política, apesar da nossa resistência em falar disto”, Georgescu Roegen.*

*“Mais do que máquinas precisamos de humanidade. Mais do que inteligência precisamos de afeição e doçura...”*, Charles Chaplin

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador professor Alexandre Szklo pela dedicação, atenção e ótimas ideias. Foi um privilégio ter feito minha tese com um professor admirável por sua postura e trajetória dentro da Universidade. Obrigada por suas sugestões, propostas, revisões e todo tipo de apoio nesta jornada do Doutorado.

Meus agradecimentos ao co-orientador Mario Giampietro e aos pesquisadores do ICTA pelos ensinamentos sobre a abordagem MuSIASEM (*Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*).

Ao Instituto de Ciências Tecnológica e Ambientais (ICTA) da Universidade Autônoma de Barcelona (UAB) por me receber pelo programa NETEP (*European-Brazilian Network on Energy Planning*).

Aos professores e funcionários do PPE.

Aos amigos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) por todo o suporte e companheirismo fruto de uma relação de anos de trabalhos juntos.

Por fim agradeço ao apoio financeiro do Programa PRH pelos 4 anos de bolsa de doutorado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## ANÁLISE MULTI-INTEGRADA DA CADEIA DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS NO SETOR RODOVIÁRIO

Amanda Pereira Aragão

Março/2018

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Mario Giampietro

Programa: Planejamento Energético

O presente estudo analisa o impacto da cadeia dos combustíveis líquidos do setor rodoviário no Brasil sobre o sistema socioeconômico e físico em que estão inseridos. São estudados os seguintes sistemas energéticos: petróleo (gasolina e diesel), biomassa de cana de açúcar (etanol anidro e hidratado) e biomassa de soja (biodiesel), para quatro etapas distintas da cadeia: i) exploração/produção recursos primários; ii) transporte dos recursos primários aos centros de transformação; iii) produção dos combustíveis líquidos rodoviário; iv) transporte dos combustíveis líquidos rodoviário. A análise do estudo é feita através de uma abordagem multi integrada com o uso da ferramenta MUSIASSEM (*Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism* - Análise Integrada Multiescala do Metabolismo Social e do Ecosistema). Trata-se de uma abordagem baseada nos princípios da teoria bioeconômica de Georgescu-Roegen, a qual propõe uma análise dos sistemas através dos elementos denominados de fundos (terra, trabalho e capacidade produtiva) e fluxos (energia e água). Assim, o estudo propõe uma visão sistêmica do impacto dos combustíveis rodoviário, no qual toda a cadeia do ciclo produtivo dos combustíveis fósseis e biocombustíveis é analisada e comparada para os elementos de fundos e fluxos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

AN INTEGRATED MULTI-SCALE APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE  
PERFORMANCE OF ROAD SECTOR SYSTEM

Amanda Pereira Aragão

March/2018

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Mario Giampietro

Department: Energy Planning

The present study analyzes the impact of the liquid fuels road sector chain in Brazil on the socioeconomic and physical system in which they are inserted. The following energy systems are studied: petroleum (gasoline and diesel), sugarcane biomass (anhydrous and hydrated ethanol) and soybean biomass (biodiesel), for four distinct stages of the chain: i) exploration / production primary energy sources; (ii) transport of primary energy sources to processing centers; (iii) production of liquid road fuels; iv) transport of liquid fuels. The analysis of the study is based on a multi-integrated approach - MUSIASEM (*Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*), which relies on the principles of Georgescu-Roegen's bioeconomic theory, which proposes an analysis of the systems through elements called funds (land, labor and productive capacity) and flows (energy and water). Thus, the study proposes a systemic view of the impact of road fuels, in which the whole chain of the productive cycle of fossil fuels and biofuels is analyzed and compared to the elements of funds and flows.



# Sumário

<b>Sumário .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Panorama da cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário.....</b>	<b>6</b>
1.1 Mercado de Combustíveis líquidos rodoviários.....	6
1.2 Panorama da cadeia produtiva .....	10
1.2.1 Panorama do setor petróleo .....	11
1.2.2 Panorama do setor de biocombustíveis.....	16
1.2.2.1 Setor sulcroalcooleiro .....	18
1.2.2.2 Mercado de biodiesel.....	20
<b>2 Bioeconomia de Georgescu Roegen .....</b>	<b>25</b>
2.1 Conceito de Bioeconomia .....	25
2.1.1 Biofísica da Economia (biophysical economics) .....	26
2.1.2 Bioeconomia (bioeconomics) .....	28
2.1.3 Bioeconomia (bioeconomy) .....	29
2.2 Bioeconomia de Georgescu Roegen .....	30
2.2.1 Mecanicismo .....	32
2.2.2 Reduccionismo .....	34
2.2.3 Sistema econômico fechado .....	34
2.2.4 Função de produção convencional .....	35
<b>3 Aspectos Metodológicos .....</b>	<b>36</b>
3.1 Metodologias disponíveis.....	36
3.1.1 Leontief (matriz Insumo Produto).....	38
3.1.2 Avaliação de ciclo de vida (ACV).....	42
3.1.3 Análise Multi integradas (Nexus/metabolismo social).....	45
3.1.3.1 Ferramentas para análise Multi integrada .....	46
3.1.3.2 Escolha da ferramenta MuSIASEM.....	48
3.2 Análise multi integrada do MuSIASEM.....	49
3.2.1 Descrição do método MuSIASEM.....	50
3.2.1.1 Fluxo/Fundos (F-F).....	52
3.2.1.2 Contabilidade energética .....	54
3.2.2 Abordagem do MuSIASEM no Setor Energético .....	56

3.2.3	Passo a passo para aplicação do MuSIASEM.....	58
3.2.3.1	Compartimentos ( <i>scaling-up</i> ).....	59
3.2.3.2	Definição dos elementos de fundo .....	60
3.2.3.3	Definição dos elementos de fluxo .....	61
3.2.3.4	Consolidação matricial ( <i>Matriz Multi level</i> ) .....	62
<b>4</b>	<b>Aplicação do MuSIASEM para a cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário .....</b>	<b>64</b>
4.1	Escopo do trabalho.....	64
4.2	Aplicação do MuSIASEM à cadeia de combustíveis líquidos rodoviário.....	64
4.2.1	Premissas para adaptação do MuSIASEM à cadeia de combustíveis .....	67
4.3	Aplicação do MuSIASEM ao Setor de Petróleo .....	70
4.3.1	Desenvolvimento da Gramática do Setor Petróleo.....	70
4.3.2	Aplicação numérica ao Setor de Petróleo .....	73
4.3.2.1	Etapa 1: Exploração e produção de petróleo .....	73
4.3.2.2	Etapa 2: Transporte #1 .....	76
4.3.2.3	Etapa 3: Refino .....	78
4.3.2.4	Etapa 4: Transporte #2 .....	82
4.4	Aplicação do MuSIASEM aos Biocombustíveis.....	84
4.4.1	Desenvolvimento da Gramática para biocombustíveis rodoviários .....	84
4.4.2	Aplicação numérica: Caso etanol .....	85
4.4.2.1	Etapa 1: Fase agrícola (Plantio e Produção) .....	86
4.4.2.2	Etapa 2: Transporte #1 .....	89
4.4.2.3	Etapa 3: Transformação (Destilarias e Usinas Mistas) .....	90
4.4.2.4	Etapa 4: Transporte #2 .....	92
4.4.3	Aplicação numérica: Biodiesel.....	93
4.4.3.1	Etapa 1: Fase agrícola (Plantio e Produção) .....	94
4.4.3.2	Etapa 2: Transporte #1 .....	95
4.4.3.3	Etapa 3: Transformação .....	96
4.4.3.4	Etapa 4: transporte #2.....	99
4.5	Considerações .....	100
<b>5</b>	<b>Resultados da Aplicação do MuSIASEM para a cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário .....</b>	<b>101</b>
5.1	Gramática do Sistema Energético (visão interna e externa).....	101
5.2	Consolidação numérica no MuSIASEM .....	104
5.2.1	Setor Petróleo .....	104
5.2.2	Setor Biomassa .....	105

5.3	Dendogramas .....	107
5.3.1	Dendogramas de FUNDOS .....	107
5.3.1.1	TERRA (LAND USE/LU) .....	108
5.3.1.2	TRABALHO (HUMAN ACTIVITY/HA) .....	110
5.3.2	Dendogramas de FLUXOS.....	112
5.3.2.1	ENERGIA .....	113
5.3.2.2	ÁGUA (Water/W).....	116
5.4	Consolidação dos Fundos e Fluxos nos Setores Energéticos (Nível n-1).....	117
<b>6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>120</b>
<b>7</b>	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>134</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1: Participação dos setores no consumo final de energia, 2015 .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 2: Frota brasileira de veículos (milhões de unidades e %), 2015.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3: Evolução da demanda de combustíveis líquidos no transporte rodoviário, 2006-2015 (%) .....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 4: Esquema representantativo da cadeia de combustíveis líquidos em 2015.....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 5: Produção de petróleo no Brasil, de 2006 a 2015 (mil barris).....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 6: Unidades de refino e processamento, 2015.....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 7: Unidades de refino e processamento, 2015.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 8: Origem do petróleo processado, 2015.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 9: Plantação de cana de açúcar (azul) e soja (verde) no Brasil.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 10: Area colhida e produção de cana de açúcar no Brasil, 2005/2015 .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 11: Localização das plantas produtoras de etanol, 2015 .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 12: Produção de etanol anidro e hidratado, 2006/2015 (mil m<sup>3</sup>) .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 13: Area plantada e produção de soja no Brasil, 2005/2015 .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 14: Localização das plantas produtoras de biodiesel, 2015.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 15: Evolução da produção de biodiesel (B100) – 2006-2015 .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 16: Etapas e aplicações de uma ACV .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 17: Modelo WEL aplicado ao estudo de biocombustíveis .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 18: Categorização energética no MuSIASEM.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 19: Gramática do MuSIASEM para o Setor Energético.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 20: Exemplo de compartimentação (definição dos níveis) no estudo de caso do MuSIASEM no Cambodia .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 21: Matriz multi-level no estudo de caso do MuSIASEM na Espanha .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 22: Cadeia de combustíveis proposto MuSIASEM.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 23: Estruturação da cadeia de combustíveis rodoviários no MuSIASEM .....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 24: Estruturação do setor petróleo no MuSIASEM .....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 25: Horas trabalhada produção petróleo (mar e terra) .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 26: Estruturação dos biocombustíveis de cana de açúcar e soja no MuSIASEM..</b>	<b>84</b>
<b>Figura 27: Visão interna e externa dos setores energéticos no MuSIASEM em 2015 .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 28: Ilustração dos resultados físicos no MuSIASEM .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 29: Ferramentas de avaliação da sustentabilidade. ....</b>	<b>134</b>
<b>Figura 30: Modos de transporte a montante e a jusante das bases. ....</b>	<b>135</b>

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Evolução da demanda de energia no transporte rodoviário, 2006-2015 (mil tep)	9
Tabela 2: Produção de derivados de petróleo, 2015.....	16
Tabela 3: Enfoque produto-atividade – tabela de usos.....	40
Tabela 4: Definição dos compartimentos para o setor de petróleo.....	72
Tabela 5: Localização da produção de petróleo (terra e mar), de 2000 a 2015.....	73
Tabela 6: Área concedidas, blocos e campos em produção (terra e mar), 2015.....	74
Tabela 7: Consumo próprio nas atividades de E&P de petróleo, 2015.....	76
Tabela 8: Produção de derivados de petróleo por refinaria (mil m <sup>3</sup> ), 2015.....	78
Tabela 9: Área ocupada pelas refinarias (mil hectares), 2015.....	79
Tabela 10: Volume de carga processada (mil m <sup>3</sup> ) e consumo energético (PJ) por refinaria, 2015.....	81
Tabela 11: Consumo de água por refinaria.....	82
Tabela 12: Definição dos compartimentos para os biocombustíveis.....	85
Tabela 13: Produção de cana de açúcar – colheitas manual e mecânica.....	86
Tabela 14: Horas trabalhadas – colheitas manual e mecânica.....	87
Tabela 15: Consumo de óleo diesel na atividade agrícola de cana de açúcar.....	88
Tabela 16: Produção de etanol por porte da unidade produtora em 2015 (mil t).....	90
Tabela 17: Consumo de óleo diesel na fase agrícola (plantio + colheita) de soja.....	95
Tabela 18: Produção de biodiesel por porte de unidade produtora.....	97
Tabela 19: Consolidado Setor Petróleo.....	105
Tabela 20: Consolidado Biomassa (cana de açúcar).....	106
Tabela 21: Consolidado Biomassa (soja).....	107
Tabela 22: Dendograma Fundo LU (Land Use) em 2015 (mil ha e %)......	108
Tabela 23: Indicadores do Fundo LU (Land Use) em 2015 (t/ha e m <sup>3</sup> /ha).....	109
Tabela 24: Indicador Uso de área final.....	109
Tabela 25: Dendograma Fundo HA (Human Activity) em 2015 (mil horas e %).....	110
Tabela 26: Indicadores de produtividade em 2015 (t/hora e m <sup>3</sup> /hora).....	112
Tabela 27: Produtividade do trabalho final.....	112
Tabela 28: Dendograma Fluxo Energia em 2015 (PJ e %).....	113
Tabela 29: Indicadores de intensidade energética.....	115
Tabela 30: Intensidade energética final.....	116
Tabela 31: Dendograma Fluxo Água em 2015 (mil m <sup>3</sup> e %).....	117
Tabela 32: Consumo específico de água.....	117
Tabela 33: Consolidação dos fundos e fluxos: comparação dos Sistemas Energéticos.....	118
Tabela 34: Consolidação final dos fundos e fluxos.....	119
Tabela 35: Produção de Água na produção de petróleo offshore no Brasil, de 2007 a 2013.....	135
Tabela 36: Estimativa fluxo água (salgada e impura) – etapa exploração e produção de petróleo (mil m <sup>3</sup> ).....	135
Tabela 37: Empregos no cultivo de soja – 1994/2010.....	136
Tabela 38: Produção de biodiesel por unidade produtora.....	137
Tabela 39: Consolidado capacidade produtiva (produção potencial).....	138
Tabela 40: Consolidado fundo e fluxos da capacidade produtiva–sistema energético petróleo (nível n).....	139

<b>Tabela 41: Consolidado fundo e fluxos da capacidade produtiva – sistema energético cana de açúcar (nível n) .....</b>	<b>140</b>
<b>Tabela 42: Consolidado fundo e fluxos da capacidade produtiva– sistema energético soja (nível n).....</b>	<b>141</b>
<b>Tabela 43: Consolidado Produção Efetiva (exclusivo combustíveis rodoviários) .....</b>	<b>142</b>
<b>Tabela 44: Consolidado fundo e fluxos da Produção Efetiva– combustíveis rodoviários gasolina e diesel (nível n) .....</b>	<b>143</b>
<b>Tabela 45: Consolidado fundo e fluxos da Produção Efetiva– combustíveis rodoviários etanol anidro e hidratado (nível n) .....</b>	<b>144</b>
<b>Tabela 46: Consolidado fundo e fluxos da Produção Efetiva– combustível rodoviário biodiesel (nível n).....</b>	<b>145</b>

## Introdução

O objetivo do estudo será avaliar, através de uma análise multi-integrada de sistemas, o impacto da cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário sobre o uso da terra, trabalho, água e energia. O estudo propiciará uma visão sistêmica e metodologicamente uniforme do impacto do ciclo produtivo dos combustíveis gasolina, diesel, etanol e biodiesel, abordagem ainda carente de literatura no Brasil. A análise multi-integrada é uma ferramenta contábil técnico-econômica baseada na teoria da bioeconomia da economia, que, em linhas gerais, analisa os sistemas como metabolismos (ecossistemas), sobretudo sobre a perspectiva de fluxos físicos de energia e material. Neste estudo em específico, tratar-se-á de aplicar a visão multi-integrada desenvolvida por Georgescu-Roegen, baseada na mensuração dos usos dos fundos e fluxos (fund-flows) (F-F), base da abordagem MuSIASEM (*Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism*) (Giampietro, 2014).

O ciclo de vida dos combustíveis, sejam eles derivados fósseis ou da biomassa, pode ser considerado um sistema energético. Suas atividades de extração, produção, transporte, processamento, distribuição e uso final acarretam impactos no sistema. O uso de recursos e a demanda por bens e serviços se inicia quando os recursos naturais para a produção do combustível são extraídos da sua origem e termina quando o mesmo é utilizado pelo consumidor final para abastecimento do veículo.

Para atender a demanda nacional de combustíveis líquidos rodoviários uma série de recursos são necessários, como por exemplo, água, terra, mão de obra, energia e tecnologia. A produção e o transporte das energias primárias e secundárias encontram-se, geralmente, associados à exploração de vários recursos naturais e à utilização de capital humano e tecnológico.

No Brasil este debate se torna intensificado pela diversidade de combustíveis líquidos sob a ótica do transporte rodoviário. No transporte de veículos leves com os automóveis e motos utilizando os combustíveis gasolina C e etanol (veículos flex-fuel e veículos cativos) e diesel final (comerciais leves), e no transporte de veículos pesados, com os ônibus e caminhões utilizando o combustível diesel final (diesel + biodiesel).

Diante desse quadro de diversidade na matriz de combustível no transporte rodoviário no Brasil, surge o debate sobre qual o impacto do consumo destes produtos no sistema em que estão inseridos. Seriam os biocombustíveis mais ou menos impactantes que os combustíveis fósseis, sob a ótica de demanda de recursos do sistema?

Este tema já foi escopo de trabalho para especialistas em diversas áreas, sobretudo nas áreas de impacto ambiental e análise de processos. No caso da aplicação para o Brasil, para análise da cadeia de biomassa e do setor petróleo, os estudos são comumente centrados na análise do uso de energia (Macedo, 2004, 2008; Seabra, 2011; Soares *et al*, 2009; EPE, 2005, Garcilasso, 2014, Silva, 2012, Marzullo, 2007) e no uso da água (Pombo, 2011; Hernandez *et al*, 2013; Hoekstra, 2009; Rossetto, 2004; Bleninger e Kotsuka, 2015). Todavia não se encontram estudos que abordem como tema o uso de terra (área em ocupação) e o uso de trabalho (mão de obra) através de uma visão da cadeia dos combustíveis. No caso do uso de terra, existem disponíveis, por exemplo, indicadores de uso de área para o plantio da biomassa (CONAB, 2017; ABIOVE, 2017) e ocupação das atividades produtivas de exploração e produção de petróleo (MME, 2015 e ANP, 2016), mas não existem estudos incorporando o uso de área das refinarias e unidades produtoras de etanol e biodiesel. No caso do uso de mão de obra, ocorre a mesma situação do uso de terra, com a existência de dados para empregados no setor agrícola de biomassa de cana de açúcar (CONAB, 2017) e exploração e produção de petróleo (ANP, 2015), mas com pouquíssima informação para as demais atividades, como transformação e transporte. Em ambos os casos (terra e trabalho) também inexistem a análise comparativa da cadeia de biomassa e do setor petróleo. Ademais, cabe destacar que os estudos relativos ao uso da energia e água são majoritariamente voltados para a análise de uma cultura específica, ora a cana de açúcar (Bleninger e Kotsuka, 2015, Seabra, 2011, Silva, 2012, Soares *et al*, 2009), ora a soja (Garcilasso, 2014), com alguns estudos comparando o ciclo do etanol e biodiesel (Hernandez *et al*, 2013, EPE, 2005). A inclusão do setor petróleo é feita comumente de forma preliminar e com estimativas simples, para efeito de comparação no resultado final. Por exemplo, em Macedo (2004) comparando etanol e gasolina, e em Marzullo (2007) comparando o biodiesel e diesel.

Assim, de modo cobrir essa lacuna de análise, de uma visão sistêmica do impacto dos combustíveis rodoviário, no qual toda a cadeia do ciclo produtivo dos combustíveis (etanol



e soja de biomassa e setor petróleo) e todos os fatores de produção (água, energia, terra, trabalho e capital) são considerados, o estudo proposto optou pela utilização de uma abordagem multi integrada, através do uso da ferramenta metodológica do MUSIASSEM (*Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism* - Análise Integrada Multiescala do Metabolismo Social e do Ecossistema).

Como será mostrado em detalhes no capítulo de abordagem metodológica (Capítulo 5), existem outros métodos possíveis de serem utilizados, como os métodos de matriz insumo produto (IP), análise de ciclo de vida (ACV), bem como outras ferramentas para a análise multi-integrada (nexus). Todavia o MuSIASEM apresenta a grande diferencial de ainda não ter sido testado para o caso do Brasil e de se basear nos conceitos da bioeconomia para a visão sistêmica do problema. Seguindo uma abordagem metodológica baseada na teoria bioeconomica de Georgescu-Roegen, que basicamente define e divide as variáveis em elementos de fluxos (energia, água, alimentos) e elementos de fundo (terra, trabalho e tecnologia), o MuSIASEM propõe uma estruturação simples e lógica de organização das variáveis (gramática do MuSIASEM) e níveis de abertura dos dados (compartimentos no MuSIASEM).

A abordagem multi-integrada do MuSIASEM foi elaborado em 1997 por Mario Giampietro (Giampietro, 2014, 2013, 2009) e vem sendo aperfeiçoada desde então pelos membros do grupo IASTE (*Integrated Assessment: Sociology, Technology and the Environment*) no Instituto de Ciências Tecnológicas e Ambientais da Universidade Autônoma de Barcelona (ICTA/UAB).

Assim, o estudo proposto além de englobar uma análise sistêmica da cadeia de combustíveis líquidos rodoviários, análise esta ainda inexistente quando da ótica das três cadeias juntas (gasolina/diesel, etanol e biodiesel), irá promover um debate sobre o tema de bioeconomia como ferramenta de análise crítica e irá testar o resultado da implementação da ferramenta do MuSIASEM para o caso brasileiro. Para tanto o estudo proposto será dividido em 7 capítulos.

No primeiro capítulo será apresentado um panorama da cadeia de combustíveis líquidos do modal rodoviário. O objetivo é contextualizar o leitor sobre as principais

características e números setoriais que servirão de base para a aplicação do método MuSIASEM. Assim, este capítulo além de destacar a participação dos combustíveis líquidos na matriz brasileira de energia, irá apresentar uma visão das cadeias produtivas dos combustíveis líquidos, a saber: o setor petróleo para a produção de gasolina A e diesel e o setor de biomassa para a produção do etanol (anidro e hidratado) e biodiesel. Não obstante a existência de séries históricas, será dado ênfase ao ano de 2015, ano base para aplicação do estudo de caso da tese.

No segundo capítulo serão discutidas as questões teóricas e históricas da construção do pensamento da bioeconomia. O capítulo mostra as diferentes abordagens do tema no decorrer do século XX, sendo o tema tratado por *biophysical economics e bioeconomics*, e nos dias atuais, sendo abordado como *bioeconomy*. Também se faz um aprofundamento das críticas e principais contribuições da bioeconomia de Georgescu Roegen, base da análise do MuSIASEM.

No terceiro capítulo, serão apresentados os aspectos metodológicos, com as alternativas metodológicas para o tema proposto e a justificativa da escolha da ferramenta MuSIASEM. Assim, na primeira parte serão apresentadas algumas das metodologias disponíveis para a análise da cadeia de combustíveis, como o método de Insumo Produto (IP), de Análise de Ciclo de Vida (ACV) e as abordagens multi-integradas; e, na segunda parte, será feito um aprofundamento da ferramenta multi integrada do MuSIASEM.

No quarto capítulo será desenvolvida a estruturação do MuSIASEM (gramática) para a cadeia de combustíveis líquidos rodoviários e a aplicação numérica com a coleta e estimativas de dados. Serão definidas as etapas da cadeia produtiva, a abordagem do setor energético, os fundos e fluxos considerados e a definição do grau de abertura dos dados (compartimentos). Na sequência, após a definição da estrutura do MuSIASEM, serão mostrados os dados considerados para a aplicação numérica da ferramenta.

No quinto capítulo serão apresentados os resultados encontrados para a aplicação numérica do MuSIASEM. Na primeira parte a apresentação da cadeia sob a ótica dos valores físicos dos recursos primários e da energia secundária. Em seguida a consolidação dos fundos

e fluxos para cada cadeia – petróleo e biomassa (cana de açúcar e soja) e posterior análise dos resultados.

E, por fim, no último capítulo serão feitas as conclusões e recomendações relevantes.

## 1 Panorama da cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário

De forma a caracterizar adequadamente o objeto de aplicação do método de análise desenvolvido nesta tese, neste capítulo será apresentado um panorama do mercado de combustíveis líquidos rodoviários (gasolina A, diesel A, etanol anidro e hidratado e biodiesel)<sup>1</sup> no Brasil. Tendo em vista que o capítulo de aplicação da abordagem do MuISASEM será desenvolvido sob o ano base de 2015, este capítulo considerará as informações relativas e/ou até o ano de 2015. Assim, na primeira parte será destacado o perfil da frota de veículos (leves e pesados) e a participação do transporte rodoviário no consumo energético total do país. Na segunda parte será feito um panorama das cadeias produtivas dos combustíveis líquidos, a saber: o setor petróleo para a produção de gasolina A e diesel A e o setor de biomassa para a produção do etanol (anidro e hidratado) e biodiesel. Basicamente será apresentada a conjuntura atual numérica de ambos os setores, envolvendo a produção dos recursos primários (petróleo e biomassa) e fontes secundárias (derivados de petróleo e biocombustíveis), cujos dados setoriais serão base para aplicação da abordagem bioeconômica do MuSIASEM no capítulo 4.

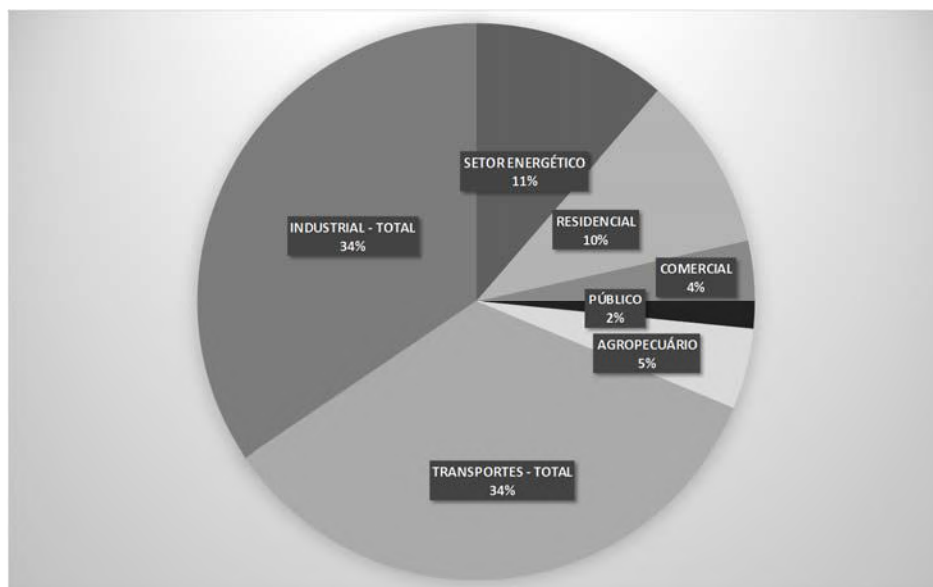
### 1.1 Mercado de Combustíveis líquidos rodoviários

De acordo com EPE (2016), o setor de transporte total (rodoviário, ferroviário, aéreo e hidroviário) representa, aproximadamente, 34% de todo o consumo final de energia no Brasil. Em 2015, o consumo final de energia foi de 260,7 milhões de tep, sendo a parcela relativa ao setor de transporte de 84,0 milhões de tep. A **Figura 1** mostra os percentuais de participação dos setores sobre o total de energia final no ano de 2015. Os maiores

---

<sup>1</sup> A gasolina A e o diesel mineral (A) são produzidos pelas refinarias e são puros, sem a adição, respectivamente, do etanol anidro e do biodiesel. O etanol anidro é adicionado à gasolina A para a composição da gasolina C, o etanol hidratado é utilizado puro em veículos e o biodiesel é adicionado ao diesel A para a composição do diesel final. As misturas são então feitas pelas distribuidoras, conforme lei, através de resoluções. O percentual de adição de etanol anidro é determinado pelo Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool (CIMA), tendo variado entre 18% e 27% em 2015, e o percentual de biodiesel é estabelecido pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), determinado em 7% em 2015 (B7).

consumidores foram, respectivamente, os setores de transporte (34%), indústria (34%), energético (11%), residencial (10%), agropecuário (5%), comercial (4%) e público (2%).



**Figura 1: Participação dos setores no consumo final de energia, 2015**

*Fonte: EPE, 2016*

Sob a ótica do setor transporte, o modal rodoviário representa 93% da demanda e os modais ferroviário, aéreo e hidroviário, os restantes 7%. Dessa forma, o transporte rodoviário representa diretamente 30% de todo o consumo final de energia do país (EPE, 2016).

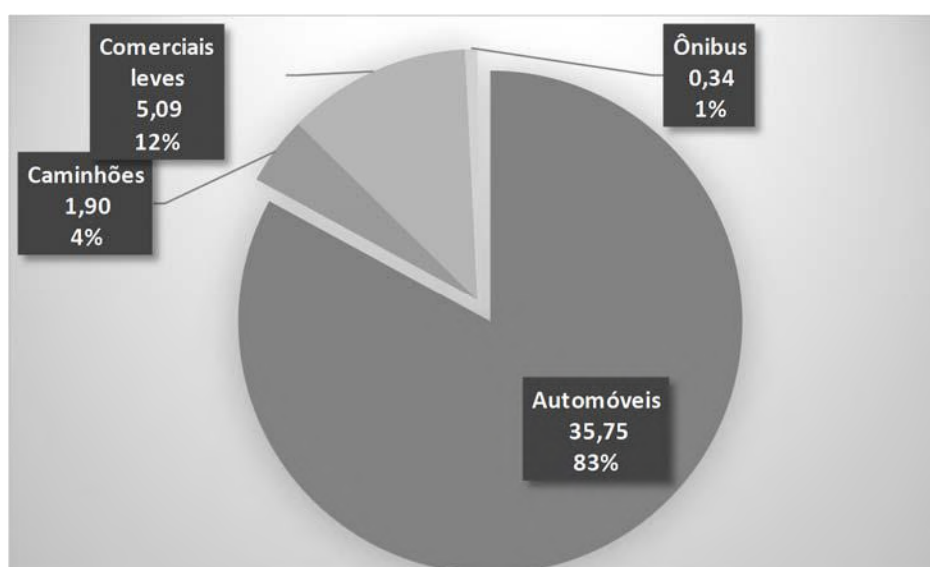
O mercado de combustíveis líquidos rodoviário engloba as categorias de veículos leves (automóveis, comerciais leves e motocicletas) e veículos pesados (caminhões e ônibus). A frota de leves é composta por veículos do tipo flex-fuel (mistura livre de etanol hidratado e gasolina C<sup>2</sup>) e veículos cativos do ciclo otto movidos à gasolina C ou a etanol hidratado. Existe também, uma parcela pequena, de comerciais leves movidos a diesel e GNV. Já a frota de veículos pesados é composta por veículos para passageiros (ônibus) e para carga

---

<sup>2</sup> A gasolina C é composta pela mistura de gasolina A (produzida nas refinarias) e etanol anidro. O percentual de adição de etanol anidro é determinado pelo Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool (CIMA), tendo variado entre 18% e 27% em 2015

(caminhões), ambos movidos exclusivamente a diesel final (diesel A acrescido de biodiesel na mistura determinada em Lei<sup>3</sup>).

A comercialização de veículos flex-fuel, iniciada no Brasil em março de 2003, experimentou desde seu lançamento uma rápida ascensão. A participação desta categoria nas vendas no mercado interno aumentou de 49,2 mil unidades em 2003, para 1,7 milhão em 2015 (ANFAVEA, 2017). A **Figura 2** mostra a frota brasileira em 2015, composta por um total de 42,7 milhões de veículos. Deste total, 83% de automóveis (35,7 milhões unidades), 12% de comerciais leves (5,09 milhões unidades), 4% de caminhões (1,9 milhão de unidades) e 1% de ônibus (340 mil unidades).



**Figura 2: Frota brasileira de veículos (milhões de unidades e %), 2015**

**Fonte: ANFAVEA, 2017**

A **Tabela 1** mostra a evolução do consumo no transporte rodoviário de 2006 a 2015. Em 2015, consumiu-se no transporte rodoviário um total de 78,3 milhões tep, sendo o maior

---

<sup>3</sup> O percentual de adição de biodiesel é estabelecido pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), sendo determinado em 7% em 2015 (B7).

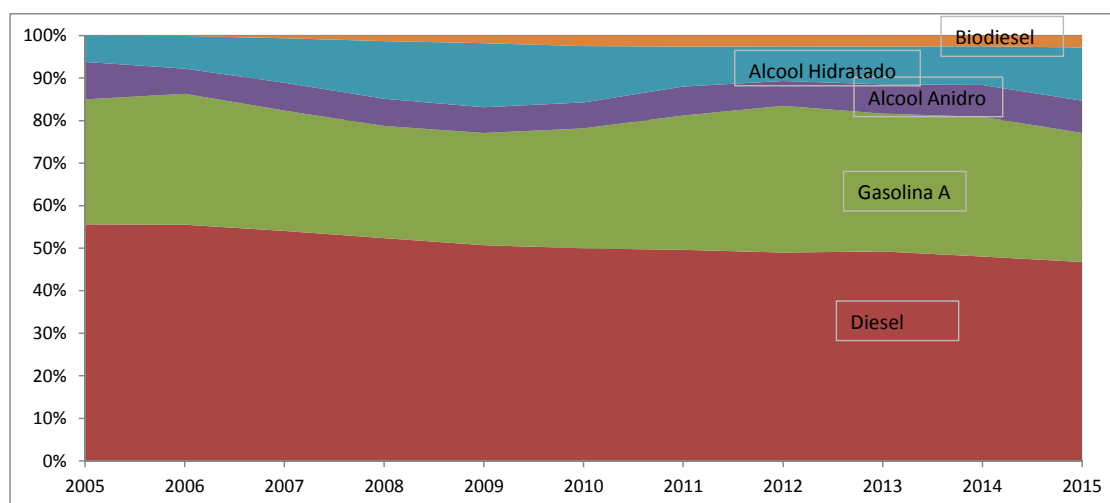
mercado o de combustível diesel final, para abastecimento de ônibus e caminhões (38 milhões tep), seguido pelos combustíveis gasolina C (29 milhões tep) e álcool hidratado (9,6 milhões tep), para veículos leves.

**Tabela 1: Evolução da demanda de energia no transporte rodoviário, 2006-2015 (mil tep)**

FONTES	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
GÁS NATURAL	2.030	2.252	2.158	1.853	1.767	1.735	1.709	1.647	1.594	1.553
ÓLEO DIESEL	26.145	27.406	28.933	28.345	31.092	32.859	34.820	37.123	37.678	36.131
BIODIESEL	57	336	728	1.019	1.547	1.729	1.833	1.954	1.983	1.902
GASOLINA AUTOMOTIVA	14.440	14.287	14.538	14.674	17.525	20.838	24.454	24.393	25.682	23.257
ÁLCOOL ETÍLICO ANIDRO	2.777	3.325	3.533	3.392	3.790	4.504	4.144	5.172	5.882	5.842
ÁLCOOL ETÍLICO HIDRATADO	3.618	5.287	7.480	8.400	8.243	6.230	5.763	6.717	7.126	9.582
TOTAL	49.067	52.892	57.370	57.683	63.963	67.896	72.721	77.007	79.945	78.267

**Fonte: EPE, 2016.**

Sob a ótica da origem dos combustíveis líquidos, o transporte rodoviário apresenta um uso intensivo de fontes fósseis, com o consumo de diesel A e gasolina A. A **Figura 3** mostra a evolução da participação dos combustíveis líquidos no transporte rodoviário de 2005 a 2015. Por todo o período, apesar de existirem anos com pequenos avanços da participação dos biocombustíveis, a demanda se mantém predominantemente de derivados de petróleo. Em 2015, o consumo de diesel A e gasolina A representou 77,9% (60,9 milhões tep) e os biocombustíveis 22,1% (17,3 milhões tep) do total.



**Figura 3: Evolução da demanda de combustíveis líquidos no transporte rodoviário, 2006-2015 (%)**

Fonte: EPE, 2016.

## 1.2 Panorama da cadeia produtiva

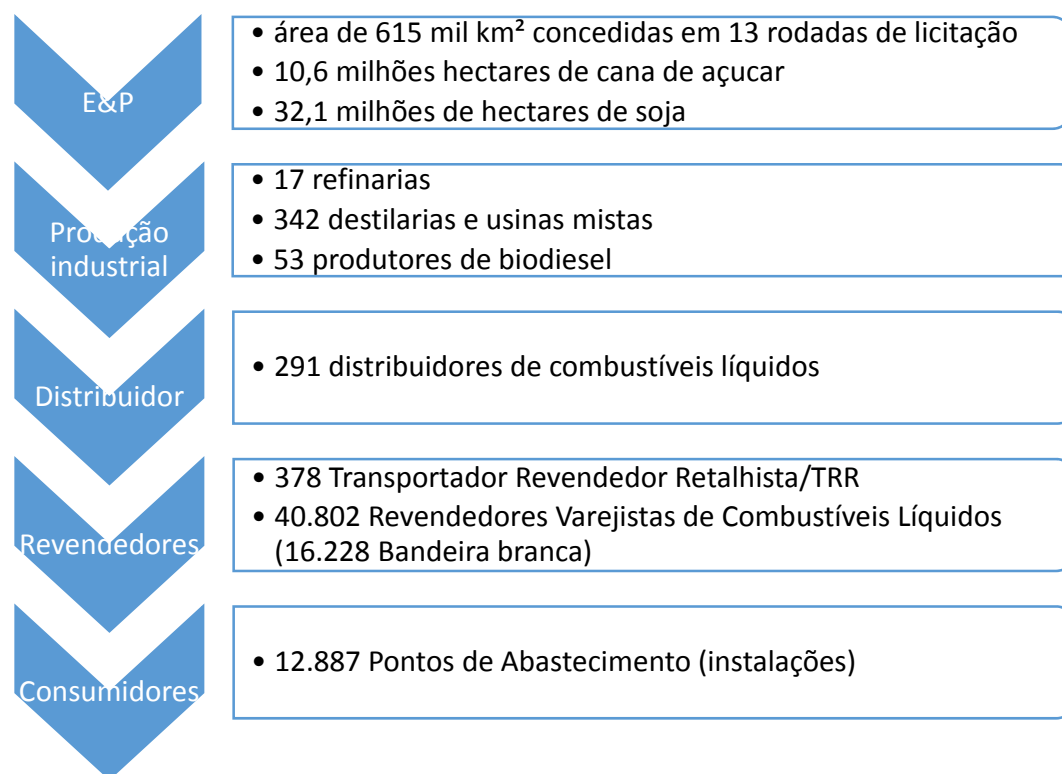
O objetivo desta seção será contextualizar o leitor sobre os dados setoriais da cadeia de combustíveis líquidos rodoviários de modo a estabelecer uma base para a aplicação do MuSIASEM<sup>4</sup>. Isto porque as atividades de produção da energia primária (*Primary Energy Sources* - PES) e energia secundária (*Energy Carriers* - EC) são o referencial para a aplicação da teoria bioeconômica de fundos e fluxos do MuSIASEM. Assim, nessa parte, destacam-se as etapas de exploração, produção e processamento das matérias primas. No caso do petróleo, as atividades de exploração e produção e de refino de petróleo, e no caso da biomassa, as atividades de plantio e produção (fase agrícola) e processamento (fase industrial) da biomassa. A etapa de distribuição dos combustíveis líquidos é feita praticamente em conjunto, tendo em vista a mistura pelas distribuidoras para a entrega do produto final: gasolina C (gasolina A+ anidro) e diesel final (diesel A + biodiesel).

A **Figura 4** mostra um resumo dos grandes números do mercado de combustíveis líquidos rodoviário para o ano de 2015. Na fase de produção da energia primária, destaca-se a área concedida de 615mil km<sup>2</sup> nas rodadas de licitação e a área total de aproximadamente

<sup>4</sup> Vide Capítulo 3 para aspectos teóricos e Capítulos 4 e 5 para aplicação do MuSIASEM.



42,7 milhões de hectares de plantio de cana de açúcar e soja. Na sequência, o parque industrial com um total de 17 refinarias, 342 usinas de etanol e 53 produtores de biodiesel. Na logística de distribuição, a presença de 291 distribuidores de combustíveis líquidos, 40,8 mil revendedores varejistas e 12,9 mil postos de abastecimento para o consumidor final (ANP, 2016).



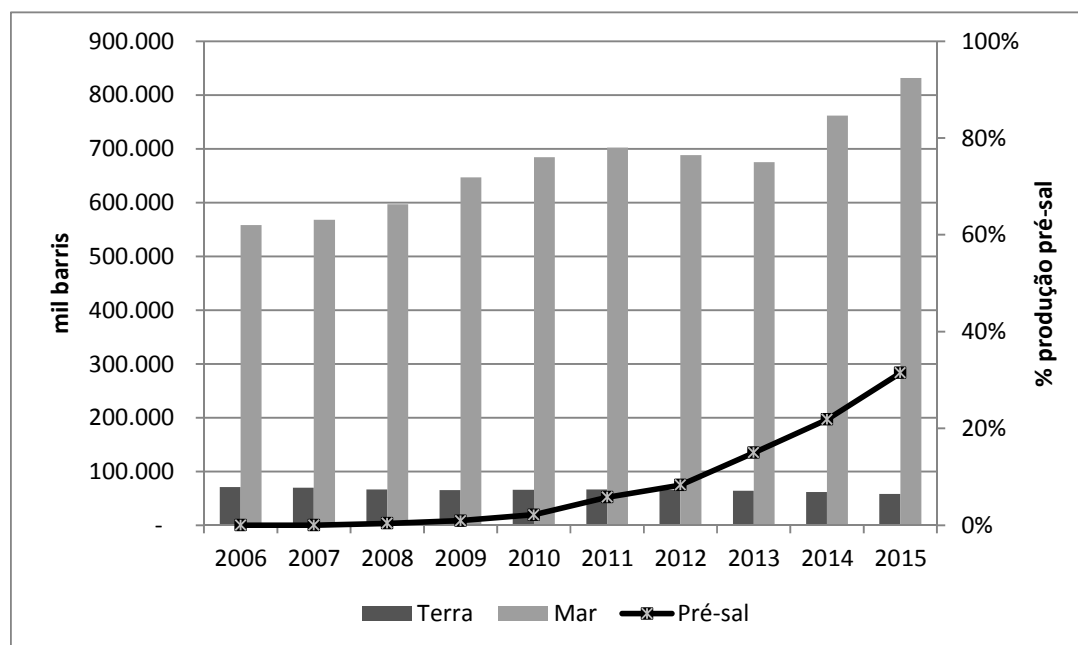
**Figura 4: Esquema representantativo da cadeia de combustíveis líquidos em 2015**

**Fonte: Elaboração própria a partir de ANP, 2016; CONAB, 2017; ABIOVE, 2016**

### *1.2.1 Panorama do setor petróleo*

Em 2015, a produção nacional de petróleo atingiu 889,7 milhões de barris, ficando na 12ª colocação do ranking mundial de produtores de petróleo. A produção de petróleo no pré-sal, iniciada no ano de 2009, aumentou em 2,6 milhões de barris, para 280,1 milhões de barris em 2015, passando a representar 31,5 % da produção nacional total. Já a produção do pós-sal se manteve bastante estável, atingido em 2015 um total de 609,6 milhões de barris (ANP,

2016) e participação de 68,5%. A **Figura 5** mostra o histórico de produção de petróleo das áreas do pós-sal e pré-sal de 2006 a 2015, em mil barris.



**Figura 5: Produção de petróleo no Brasil, de 2006 a 2015 (mil barris)**

**Fonte: ANP, 2016.**

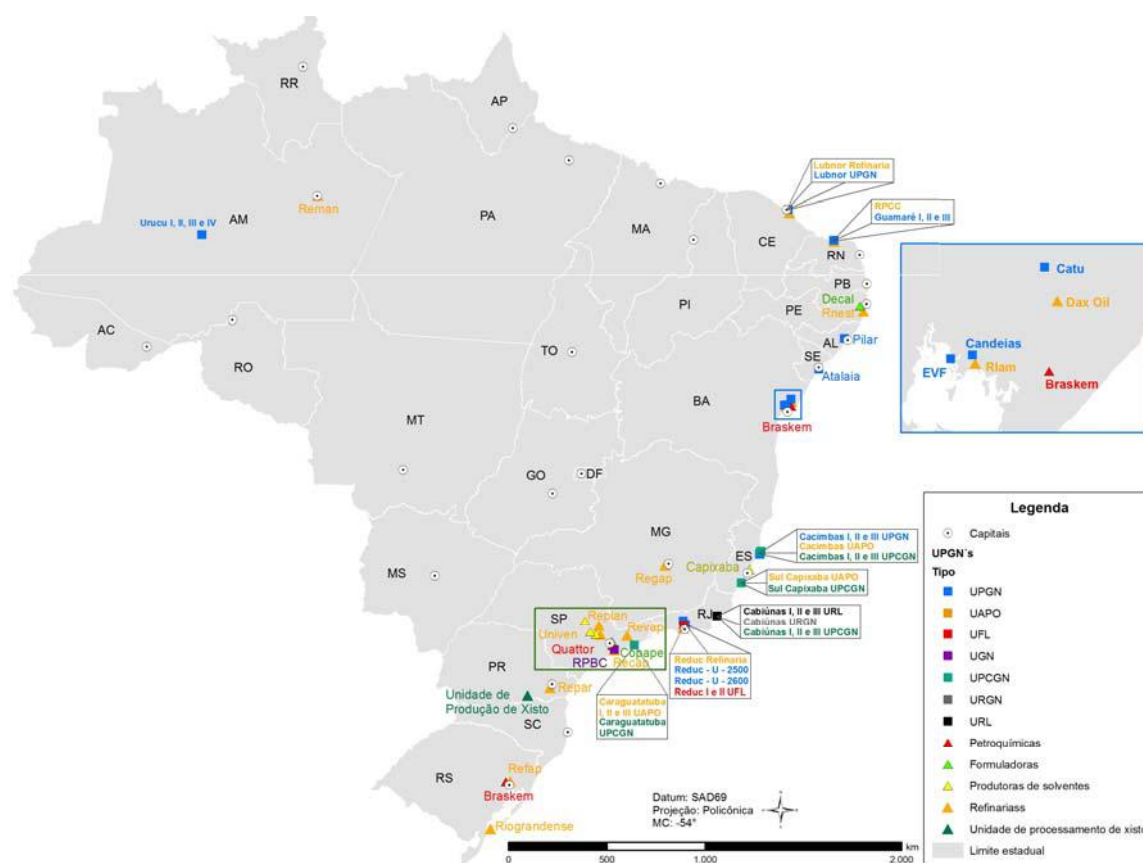
Conforme também mostra a **Figura 5**, a produção de petróleo no Brasil é concentrada na exploração em mar (*offshore*), correspondendo em 2015 a 93,4% do total, com uma produção de 831,3 milhões de barris. O Rio de Janeiro manteve a liderança da produção total do País, sendo responsável por 71,8% da produção em mar e 67,1% da produção total. De acordo com ANP (2016), foram produzidas no Brasil 67 correntes de petróleo com densidade média de 29,38 graus API e teor de enxofre de 0,52% em peso.

No que se refere à atividade de refino, o parque brasileiro é composto por 17 refinarias, sendo quatro refinarias privadas<sup>5</sup> e 13 de propriedade da empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras)<sup>6</sup>. O período que se estendeu da criação da Petrobras (1954) até o

<sup>5</sup> Manguinhos (RJ), Riograndense (RS), Dax Oil (BA) e Univen (SP).

<sup>6</sup> Lubnor (CE), Recap (SP), Reduc (RJ), Refap (RS), Regap (MG), Reman (AM), Repar (PR), Replan (SP), Revap (SP), Rlam (BA), RPBC (SP), RPCC (RN) e Rnest (PE).

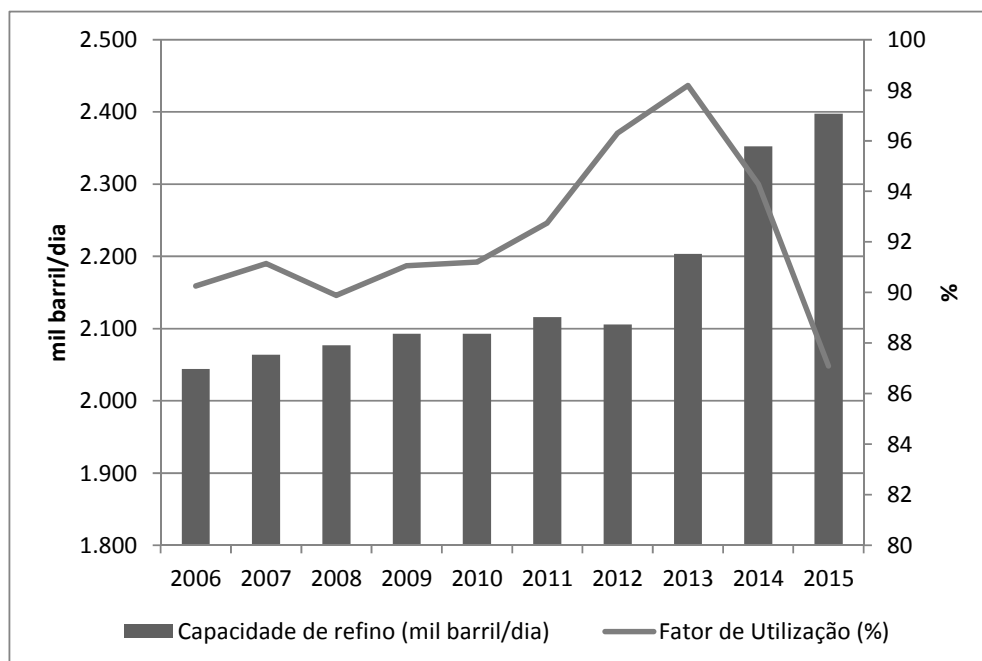
segundo choque do petróleo foi marcado pelos investimentos na infraestrutura nacional de abastecimento. Assim, todo parque de refino brasileiro foi construído até 1980, quando entrou em operação a última refinaria, a Refinaria Henrique Large (REVAP), em São José dos Campos/SP. Nos anos 50 foram criadas as refinarias RLAM, RECAP, RPBC e REMAN. Nos anos 60 foram criadas as refinarias REDUC, LUBNOR, REGAP e REFAP. E, por fim, RPLAN, REPAR e REVAP. Desde então, a capacidade nacional de processamento de petróleo vem sendo ampliada através da modernização e expansão das unidades existentes (REVAMPS). A **Figura 6** mostra distribuição geográfica das unidades de refino no Brasil em 2015, concentradas, sobretudo, na região Sudeste.



**Figura 6: Unidades de refino e processamento, 2015**

Fonte: ANP, 2016.

A seguir a **Figura 7** mostra a evolução da capacidade de refino do período de 2006 a 2015. A capacidade total de processamento do parque de refino atingiu em 2015 um total de 2,4 milhões de barris/dia<sup>7</sup>, com um fator de utilização 87,1%. Assim, o total da carga processada foi de 2 milhões de barris/dia.

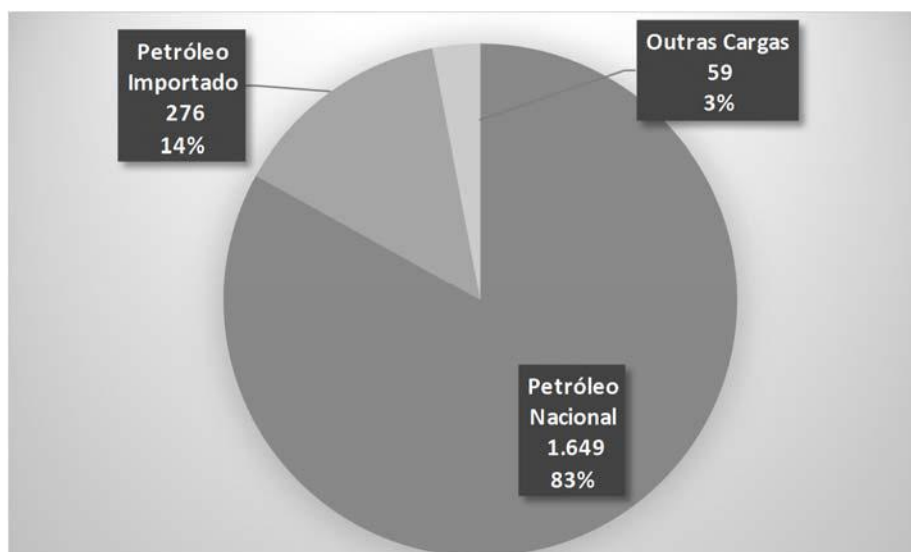


**Figura 7: Unidades de refino e processamento, 2015**

**Fonte: ANP, 2016.**

Do volume total processado, a carga de petróleo respondeu por 97% do total, sendo 14% de origem importada (276,0 mil barris/dia) e 83% de origem nacional (1,6 milhão barris/dia), e os 3% restantes de outras cargas (ANP, 2016). A **Figura 8** mostra a participação do petróleo nacional, importado e outras cargas (resíduos de petróleo, resíduos de terminais e resíduos de derivados) no total processado.

<sup>7</sup> A capacidade de refino medida em barris/dia-calendário foi de 2,28 milhões de barris/dia.



**Figura 8: Origem do petróleo processado, 2015**

**Fonte: ANP, 2016.**

O parque de refino produziu um total de 118 milhões de m<sup>3</sup> de derivados energéticos e não energéticos de petróleo<sup>8</sup>. Os maiores volumes de produção foram os combustíveis diesel A e a gasolina A, com respectivamente, 41% e 22% da produção. Assim, conforme é apresentado na **Tabela 2** a soma dos dois combustíveis líquidos representou 63,5% (75,2 milhões m<sup>3</sup>) da produção total de derivados.

---

<sup>8</sup> Uma pequena parcela da oferta de derivados é produzida pelas centrais petroquímicas, UPGNs e outros produtores. Em 2015 este volume foi de 3,6 milhões de m<sup>3</sup>, ou 3% do total (ANP, 2016).

**Tabela 2: Produção de derivados de petróleo, 2015**

Derivados de petróleo	Produção (m³)	%
	TOTAL	
<b>Total</b>	<b>118.448.715</b>	<b>100,0%</b>
<b>Energéticos</b>	<b>103.049.879</b>	<b>87,0%</b>
Gasolina A	25.726.164	21,7%
Gasolina de aviação	72.486	0,1%
GLP	7.426.409	6,3%
Óleo combustível	14.339.295	12,1%
Óleo diesel	49.457.609	41,8%
QAV	5.656.859	4,8%
Querosene iluminante	7.396	0,0%
Outros	363.660	0,3%
<b>Não energéticos</b>	<b>15.398.837</b>	<b>13,0%</b>

**Fonte: ANP, 2016.**

No que se refere às bases de distribuição de combustíveis líquidos, em 2015 havia um total de 291 bases autorizadas pela ANP, com uma capacidade nominal de armazenamento de 3,8 milhões de m³. Deste total, 75,3% destinaram-se aos derivados de petróleo (exceto GLP), (ANP, 2016).

### *1.2.2 Panorama do setor de biocombustíveis*

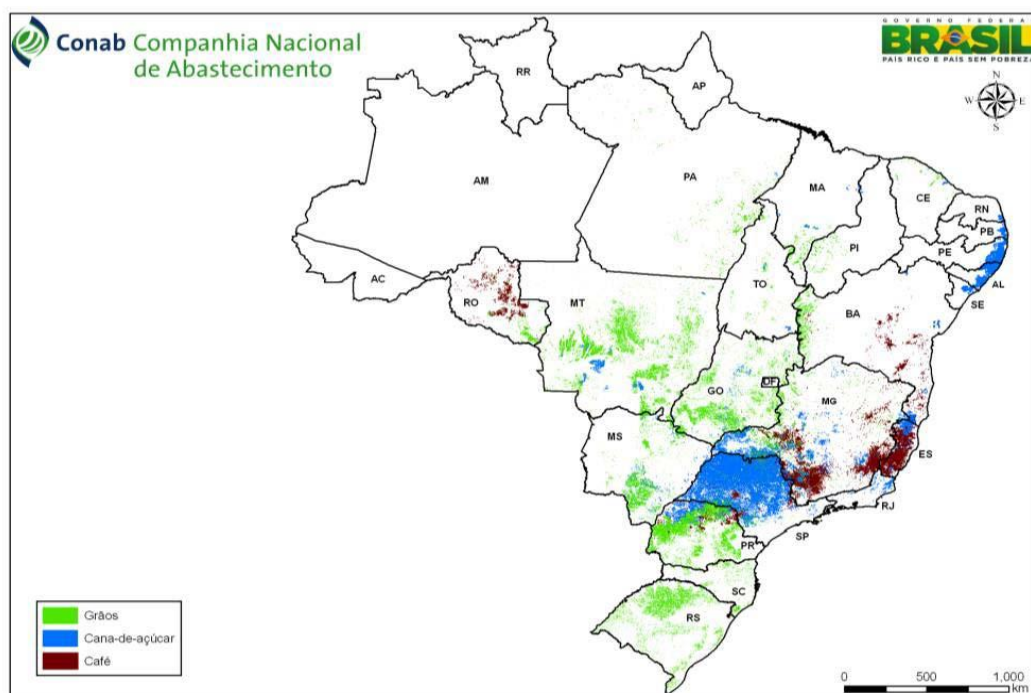
A produção agrícola de biocombustíveis<sup>9</sup> para consumo no transporte rodoviário (etanol e biodiesel) se baseia sobretudo nas culturas de cana-de-açúcar e soja<sup>10</sup>. Em 2015, a

<sup>9</sup> Os biocombustíveis de primeira geração, ou convencionais, são aqueles produzidos a partir de fontes agrícolas primárias, tais como o etanol da cana-de-açúcar ou milho e o biodiesel de oleaginosas. Os biocombustíveis avançados (segunda e terceira geração) são aqueles produzidos a partir do aproveitamento de resíduos da produção de primeira geração (como o etanol lignocelulósico, obtido a partir do bagaço da cana) e de outras fontes de biomassa, aumentando significativamente a produtividade agrícola e a eficiência tecnológica industrial das rotas de conversão convencionais, assim reduzindo a pressão sobre os recursos naturais (Maroun, 2014).

<sup>10</sup> O biodiesel de origem de soja representou 78% em 2015. Os 22% restantes tiveram origem na gordura animal (inclui gordura bovina, gordura de frango e gordura de porco), óleo de algodão e outros materiais graxos (inclui óleo de palma, óleo de amendoim, óleo de nabo-forrageiro, óleo de girassol, óleo de mamona, óleo de sésamo, óleo de fritura usado e outros materiais graxos) (ANP, 2016).

área colhida de cana-de-açúcar ocupou 9,0 milhões de hectares das áreas aráveis do país, com uma produção total de 634,8 milhões de toneladas e produtividade de 70 toneladas por hectare (CONAB, 2017). Com relação à soja, a produção se estendeu por uma área de 31,9 milhões de hectares, com uma produção total de 96,9 milhões de toneladas e produtividade de 3,0 toneladas por hectare (ABIOVE, 2017; CONAB, 2017).

De acordo com CONAB, 2017 e EMBRAPA, 2017, com estes volumes de produção o Brasil ocupa o ranking de maior produtor de cana de açúcar do mundo e de segundo maior produtor de soja (EUA líder produção). A **Figura 9** mostra a distribuição no país da cana de açúcar e soja. A produção de cana de açúcar concentrada nas regiões sudeste (87%) e nordeste (13%) e a produção de soja nas regiões centro-oeste, sul e sudeste.

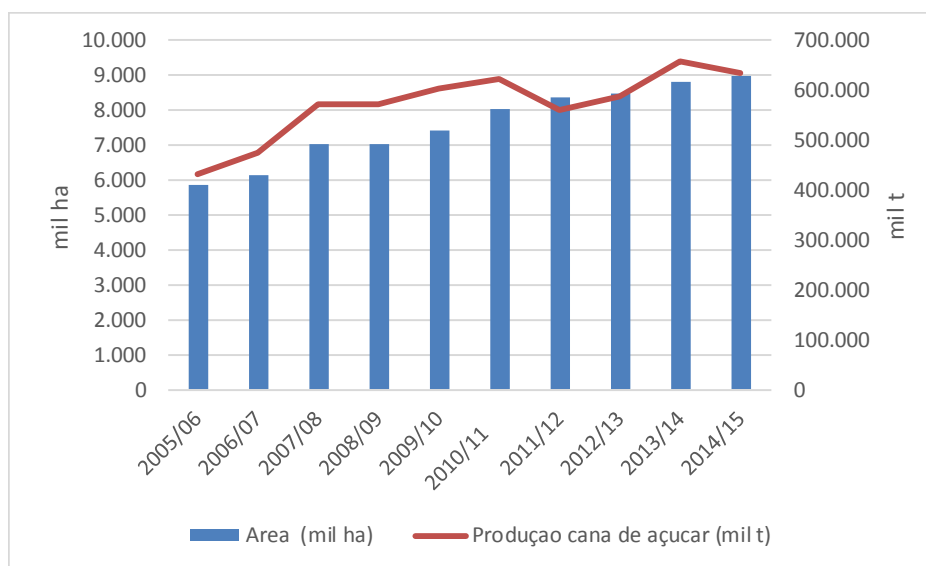


**Figura 9: Plantação de cana de açúcar (azul) e soja (verde) no Brasil**

**Fonte: CONAB, 2013.**

### 1.2.2.1 Setor sucroalcooleiro

O Brasil é o maior produtor de cana-de açúcar do mundo, seguido pela Índia, China e Tailândia. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, a área total colhida pelo setor sucroalcooleiro, na safra 2014/15, foi de 9,0 milhões de hectares e a produção de cana de açúcar foi de 634,8 milhões de toneladas, com uma produtividade de 70 t/ha. A **Figura 10** mostra a evolução da área colhida e a produção do setor sucroalcooleiro no período de 2005 a 2015. A área colhida passou de 5,8 milhões/ha para 9,0 milhões/ha no período, com um crescimento acumulado de 54% e a produção de cana de açúcar passou de 431 milhões ton para 634,8 milhões de toneladas, com um crescimento acumulado de 47%.

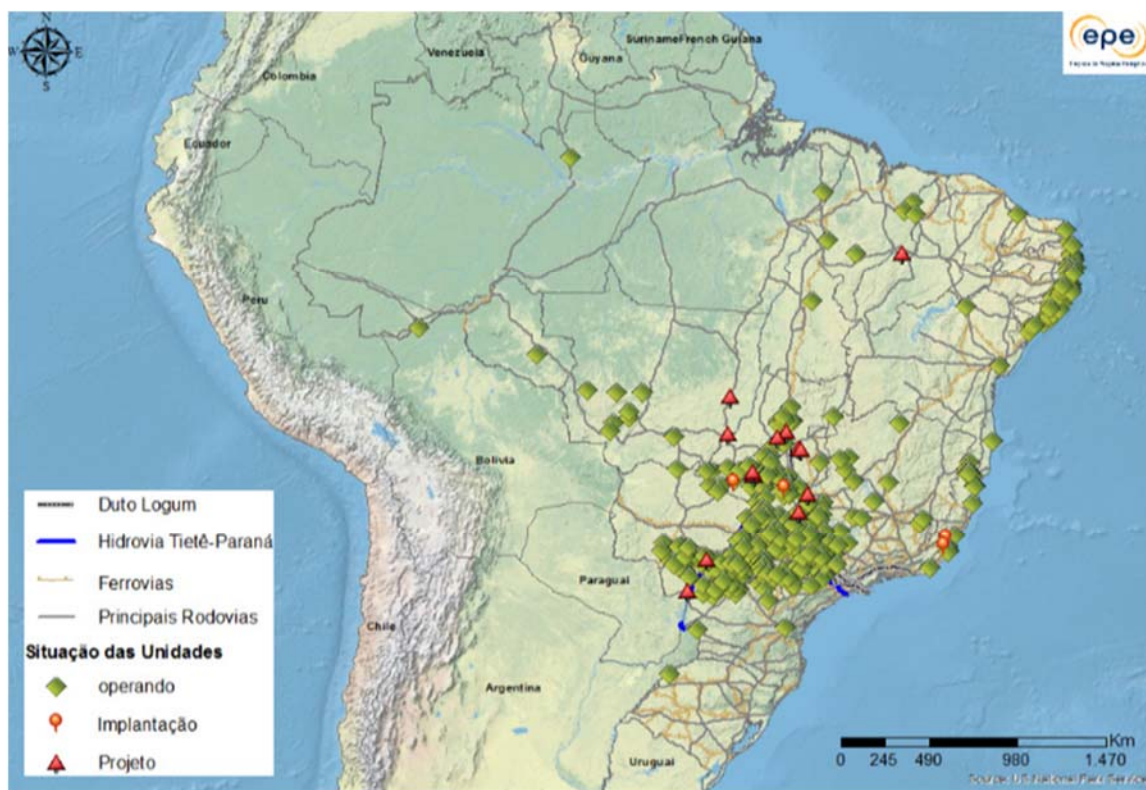


**Figura 10: Área colhida e produção de cana de açúcar no Brasil, 2005/2015**

**Fonte: CONAB, 2017.**

Da produção total de cana de açúcar uma parcela é destinada à produção de açúcar e outra parcela é destinada à produção de etanol. Em 2015, de acordo com CONAB (2017) e EPE (2017), foram produzidas 33,5 milhões de toneladas de açúcar e 30,2 milhões de m³ de etanol. A produção de etanol foi realizada por um total de 342 plantas (mista e destilaria), concentradas nas regiões sudeste (São Paulo), centro-oeste e nordeste, conforme mostra a **Figura 11**.





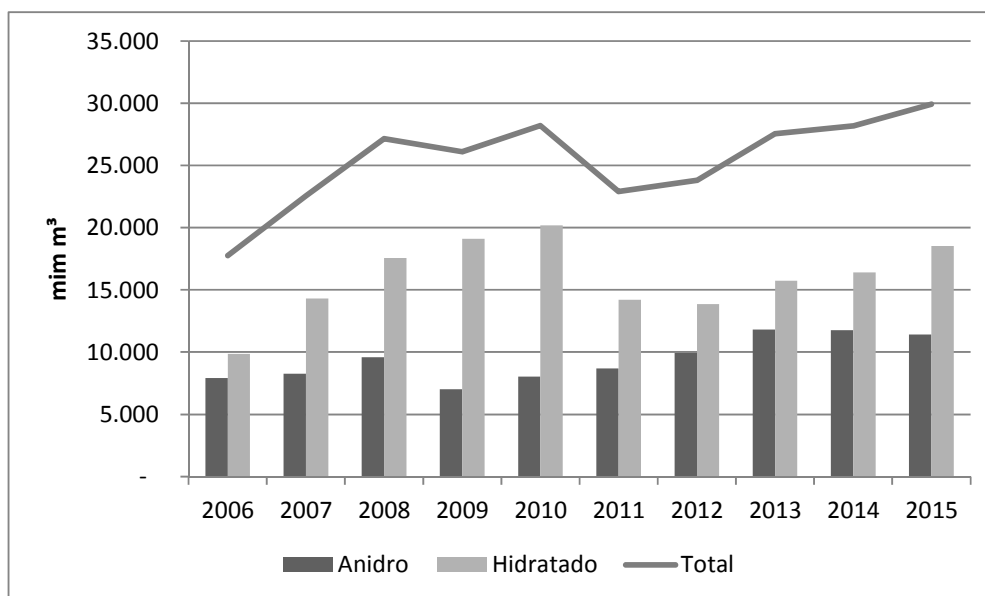
**Figura 11: Localização das plantas produtoras de etanol, 2015**

**Fonte: EPE, 2016**

Para atender o mercado interno, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) define os teores máximos e mínimos de adição do etanol anidro à gasolina A para compor a gasolina C. A definição dos teores varia conforme política pública de preços e em decorrência de ajustes à oferta interna do produto. Até abril de 2011, a gasolina comercializada no Brasil possuía, como faixa limite na mistura, 20 a 25% (em base volumétrica) de etanol anidro (Portaria MAPA nº 7/2010), a partir de maio de 2011 essa faixa foi alterada para 18 a 25% (MP nº 532/2011) e em 2015, o máximo foi alterado para 27% (Portaria MAPA nº75/2015).

Dessa forma, a produção de etanol anidro será sempre um percentual correspondente ao volume de gasolina A produzida. Já o volume produzido de etanol hidratado, considerando a capacidade produtiva das usinas, será em função do mercado interno (veículos flex-fuel) e

das exportações (principal destino a América do Norte, em particular, os Estados Unidos<sup>11</sup>). A **Figura 12** mostra a evolução da produção de etanol anidro e hidratado do período de 2006 a 2015. Em 2015, a produção total de etanol foi de 30,2 milhões m<sup>3</sup>, sendo a parcela de anidro de 11,6 milhões m<sup>3</sup> (38,1%) e de hidratado de 18,6 milhões m<sup>3</sup> (61,9%).



**Figura 12: Produção de etanol anidro e hidratado, 2006/2015 (mil m³)**

**Fonte: EPE, 2017.**

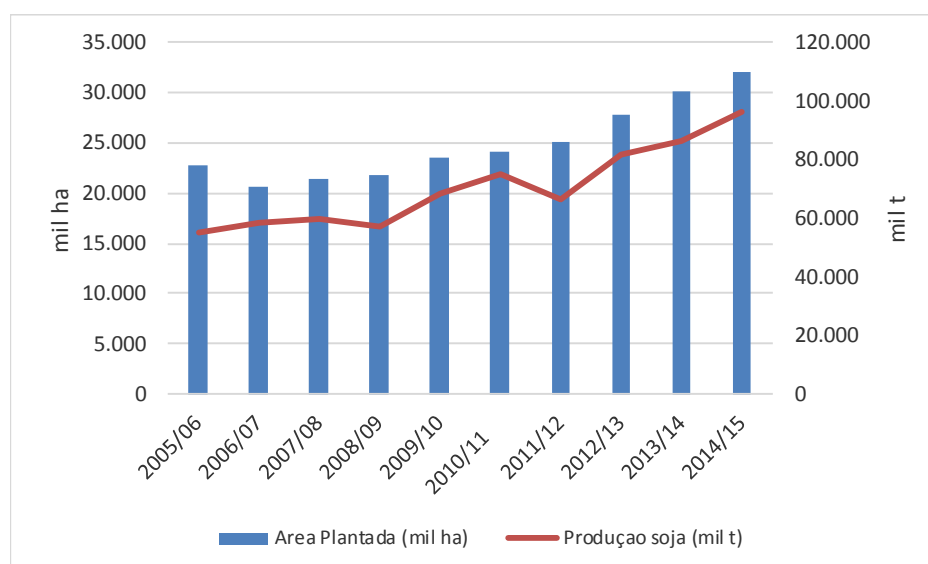
#### 1.2.2.2 Mercado de biodiesel

As matérias-primas utilizadas para a produção do biodiesel são derivadas de óleos vegetais - soja, mamona, palma, entre outros; óleos de origem animal - gordura bovina, suína e de aves; e outras matérias primas - óleo utilizado para cocção de alimentos (fritura). Todavia, apesar da grande variedade de matérias primas, a produção de biodiesel no Brasil é

<sup>11</sup> De acordo com ANP (2016), em 2015 os EUA importaram 925,9 mil m<sup>3</sup> de etanol, representando 49,6% do total exportado pelo País.

concentrada na produção de soja. Em 2015, conforme ANP (2016), a produção de biodiesel proveniente do óleo de soja representou 78% da produção total<sup>12</sup>.

De acordo com CONAB (2017), a área total colhida de soja, na safra 2014/15, foi de 31,9 milhões de hectares e a produção de soja foi de 96,9 milhões de toneladas, com uma produtividade de 3,0 t/ha. A **Figura 13** mostra a evolução da área colhida e a produção de soja no período de 2005 a 2015. A área plantada passou de 22,7 milhões/ha para 31,9 milhões/ha no período, com um crescimento acumulado de 41% e a produção de soja passou de 55,0 milhões toneladas para 96,9 milhões de toneladas, com um crescimento acumulado de 75%.

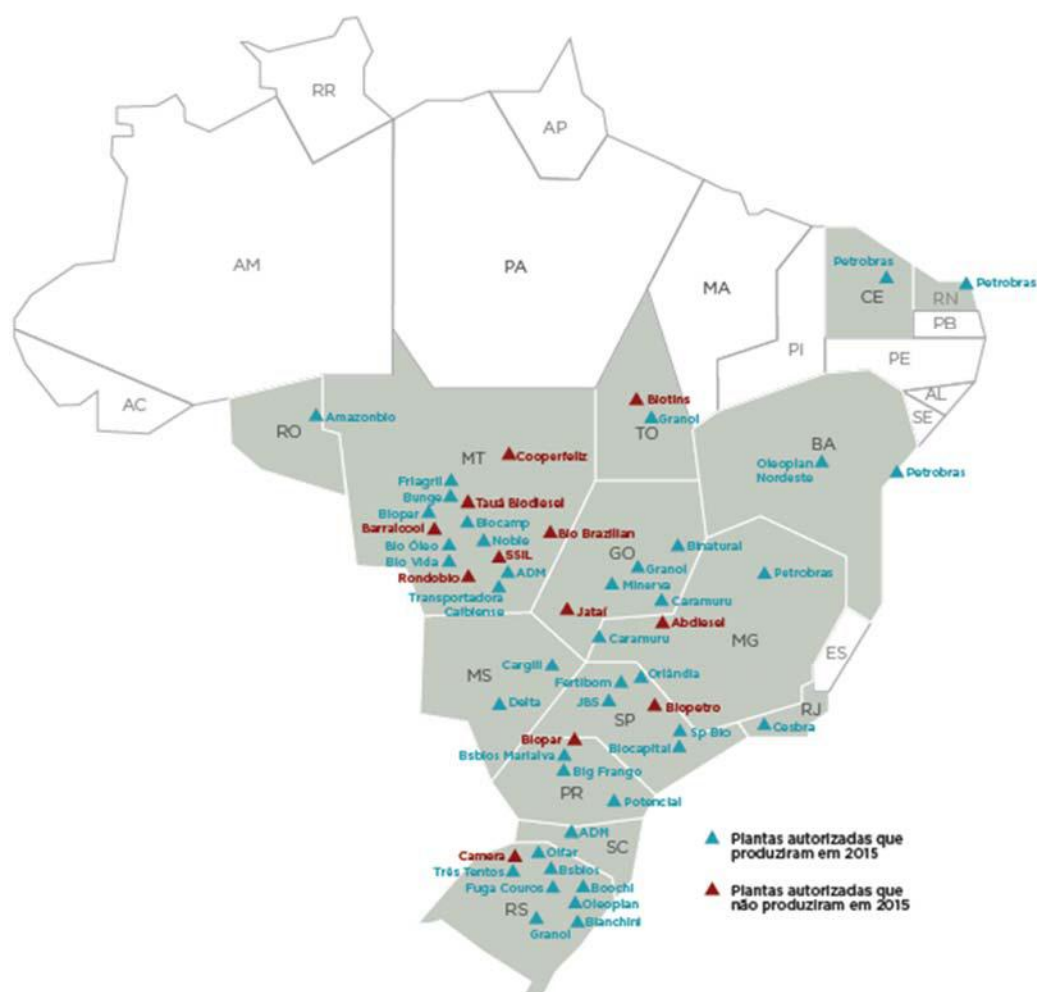


**Figura 13: Área plantada e produção de soja no Brasil, 2005/2015**

**Fonte: CONAB, 2017.**

A mistura de biodiesel ao diesel A teve início em dezembro de 2004, em caráter autorizativo. Em janeiro de 2008, entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória de 2% (B2), em todo o território nacional. Com o amadurecimento do mercado brasileiro, esse percentual foi ampliado pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)

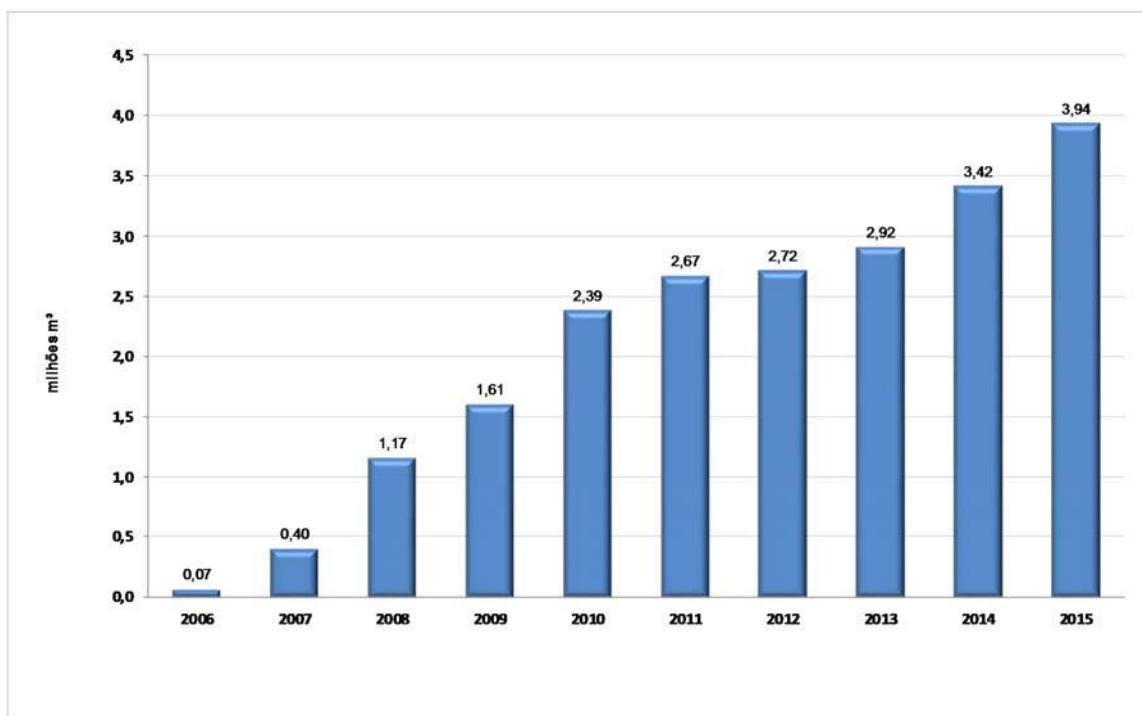
<sup>12</sup> Os 22% restantes tiveram origem na gordura animal (inclui gordura bovina, gordura de frango e gordura de porco), óleo de algodão e outros materiais graxos (inclui óleo de palma, óleo de amendoim, óleo de nabo-forrageiro, óleo de girassol, óleo de mamona, óleo de sésamo, óleo de fritura usado e outros materiais graxos) (ANP, 2016).



**Figura 14: Localização das plantas produtoras de biodiesel, 2015**

**Fonte: ANP, 2016**

Em 2015, a capacidade nominal para produção de biodiesel (B100) no Brasil foi de cerca de 7,4 milhões de m<sup>3</sup>. Entretanto, a produção nacional foi de 3,9 milhões de m<sup>3</sup>, o que correspondeu a 53,3% da capacidade total<sup>13</sup>. Diferentemente do etanol, a produção de biodiesel é toda destinada ao consumo interno, não havendo exportação do produto. A **Figura 15** mostra a evolução da produção de biodiesel (B100) de 2006 a 2015.



**Figura 15: Evolução da produção de biodiesel (B100) – 2006-2015**

**Fonte: ANP, 2016**

Para a distribuição e comercialização ao consumidor final, o biodiesel é misturado ao diesel A. Como mencionado anteriormente, o percentual de mistura varia conforme

<sup>13</sup> A capacidade instalada da produção de biodiesel é superior a demanda do produto. Em 2015, de acordo com EPE (2017), para viabilizar a aquisição do excedente de biodiesel, algumas regras vigentes foram alteradas a partir do leilão seguinte (48°), sendo então suprimidas: a autorização dos órgãos ambientais estaduais, as declarações de concordância dos fabricantes de motores (ou declaração de usuário final assumindo qualquer risco), a identificação do responsável pela análise do combustível utilizado e a relação dos veículos que utilizariam a mistura autorizativa.

especificação definida em lei e, os principais consumidores do produto final são os veículos pesados – caminhões e ônibus.

Assim, neste capítulo foram apresentados os dados setoriais da produção de biocombustíveis líquidos que servirão de base para o desenvolvimento e aplicação da ferramenta MuSIASEM no capítulo 4. No setor petróleo, destaca-se a concentração da produção *offshore* (93% do total), o crescimento da participação da produção dos campos do pré-sal e alta participação do diesel A e a gasolina A (73%) no total de derivados energéticos produzido pelo parque de refino nacional. Quanto aos biocombustíveis líquidos, ressalta-se a importância da atividade agrícola, com o uso de 42 milhões de hectares de terra para as atividades de plantio e produção das biomassas de cana de açúcar e soja.

No próximo capítulo serão apresentados os aspectos teóricos do pensamento da bioeconomia da energia, base para entendimento e aplicação da abordagem MuSIASEM. Será feita uma contextualização histórica e teórica, bem como serão destacados os principais pensadores relativos ao tema.

## 2 Bioeconomia de Georgescu Roegen

Este capítulo visa mostrar a bioeconomia de Georgescu Roegen, base para a estrutura conceitual da abordagem do MuSIASEM. Na primeira parte, visto que este conceito não é tratado de uma forma homogênea na literatura, pontuam-se as diferentes conceituações/visões, como a bioeconomia (*bioeconomics*), a biofísica da economia (*biophysical economics*) e a bioeconomia atual (*bioeconomy*). Na segunda parte é mostrada a bioeconomia de Georgescu, com destaque para seus principais conceitos e críticas a economia tradicional.

### 2.1 Conceito de Bioeconomia

O termo Bioeconomia foi cunhado pelo biólogo britânico Hermann Reinheimer em seu trabalho “*Evolution by Co-operation: A Study in Bioeconomics*” publicado em 1913. O termo, originalmente em inglês *Bioeconomics*, compreende duas palavras: biologia e economia, e sugere que a economia pode ser vista como disciplina interdisciplinar que incorpora as questões das ciências naturais (Zawojnska e Siudek, 2016).

Todavia, a consolidação da bioeconomia como um campo científico ocorre somente nos anos 70, quando da publicação do clássico “*The Entropy Law and the Economic Process (1971)*” (A Lei da entropia e o processo econômico), de Nicholas Georgescu-Roegen. Esta difere da teoria econômica tradicional utilizando princípios termodinâmicos e/ou ecológicos que enfatizam o papel dos recursos naturais no processo econômico, bem como identificando as áreas da teoria econômica que negligenciam considerações ambientais (Cleveland, 1987).

No período que decorre da criação do termo à consolidação da bioeconomia por Georgescu, diversas publicações utilizam de princípios biológicos e físicos básicos para auxiliar na análise econômica. Estes estudos são denominados ao longo da literatura

especializada pelo termo de biofísica da economia (*biophysical economics*) (Giampietro e Mayumi, 2009; Hall, 2017; Cleveland, 1999, Bobulescu, 2015).

### 2.1.1 *Biofísica da Economia (biophysical economics)*

A biofísica da economia é estudada por uma gama de pensadores, de diversos campos da ciência: físicos, químicos, economistas, sociólogos, biólogos e etc. Pensadores de destaque como o químico Frederick Soddy, o estatístico e matemático Alfred Lotka, o sociólogo Frederick Cottrell e o ecologista Howard Odum. Todos estes autores contribuem introduzindo novos questionamentos e conceitos sobre o papel da energia na economia, que posteriormente são abordados ou discutidos dentro da consolidada bioeconomia (*bioeconomics*).

Frederick Soddy, ganhador do Prêmio Nobel de Química, preocupa-se com o papel da energia nos sistemas econômicos. Dentre várias publicações, em “*Wealth, Virtual Wealth and Debt*” (1926) critica o foco excessivo dos economistas na análise dos fluxos monetários para estudar as mudanças econômicas. De acordo com o autor, a riqueza real é gerada pelo uso de energia para transformar materiais em bens e serviços (processo biofísico de produção e consumo de bens e serviços). O grande impulso no progresso econômico experimentado no século 20 teria sido devido à mudança massiva para a energia fóssil como fonte de energia primária. A falha fatal da economia estaria na confusão do conceito de riqueza, que tem uma dimensão física, com o conceito de dívida, que se refere a uma quantidade puramente matemática. Os bancos criam dinheiro arbitrariamente através do sistema de reservas obrigatórias e, em seguida, emprestam o dinheiro "fictício" a juros. A riqueza, a quantidade física representada pelo dinheiro, não pode crescer para sempre em uma taxa de juros composta, como as leis da termodinâmica claramente implicam. Soddy postulou que em algum ponto as dívidas ultrapassariam a riqueza, causando o colapso do sistema bancário, citando a grande depressão (Cleveland, 1999; Giampietro e Mayumi, 2009).

Alfred Lotka, estatístico e matemático, discute em “*Contribution to the energetics of Evolution*” (1922) que os mecanismos da seleção natural podem ser explicados em termos de energia. Lotka não aplica especificamente seus princípios biofísicos à economia, mas suas



teorias são posteriormente usadas por outros analistas (Odum, 1971) para enfatizar a relação entre a qualidade da energia e os sistemas vivos. Para o autor, quanto maior a capacidade dos sistemas biológicos (isto é, organismos individuais, espécies e ecossistemas) de reunir insumos de energia e convertê-los em trabalho (crescimento, reprodução e manutenção), maior será sua taxa de sobrevivência (maximização do uso da energia). Lotka propõem a criação de um novo campo da economia, que teria de se basear na análise integrada do metabolismo dos fluxos de energia e de materiais em relação à performance econômica e estabelece pela primeira vez a distinção entre a energia endossomática (conversores de energia humanos) e a energia exossomática (conversores de energia não-fisiológicos) (Cleveland, 1999; Martinez-Alier, 2015).

Frederick Cottrell, sociólogo norte-americano, discute em *Energy and Society* (1955) uma análise da relação entre mudanças socioeconômicas e mudanças no padrão metabólico associado à estrutura e função da sociedade. O autor descreve a evolução da cultura em termos de maior controle sobre a transformação de energia. Foi o primeiro cientista social a identificar a importância do rendimento energético líquido ou, o excedente energético, fornecido pelo setor energético à sociedade. Cottrell enfatizou a relação entre a quantidade de energia utilizada para subsidiar os esforços do trabalho e a produtividade do trabalho. Para ele a Revolução Industrial foi revolucionária em termos econômicos, porque o trabalho humano foi complementado por enormes quantidades de energia na forma de combustíveis fósseis (carvão). Esses subsídios aumentaram sem precedentes na quantidade de trabalho realizado por hora de trabalho (Cleveland, 1999; Giampietro e Mayumi, 2009).

Howard Odum, ecologista de sistemas, desenvolve em *Environment, Power, and Society* (1971) uma metodologia sistemática usando fluxos de energia para analisar de modo integrado os sistemas dos seres humanos e da natureza. Odum combina a teoria da seleção natural de Darwin com a teoria de maximização da energia de Lotka em uma "lei geral de energia": a maximização do trabalho útil obtido a partir da conversão de energia é o critério para a seleção natural – princípio da potência máxima – os sistemas ecológicos sobrevivem e prosperam devido ao uso da energia a uma taxa ótima (Odum, 1971). Duas das mais importantes contribuições de Odum para a economia biofísica são as discussões da qualidade da energia e o fluxo de energia e dinheiro na economia. Quanto ao primeiro ponto, da

qualidade energética, refere-se à capacidade da economia de usar diferentes combustíveis na produção econômica (produção/kcal). Argumenta que, como os combustíveis diferem em qualidade, as sociedades com acesso a combustíveis de melhor qualidade têm uma vantagem econômica sobre aquelas com acesso a combustíveis de menor qualidade. Quanto ao segundo ponto, argumenta que a energia é a fonte de valor econômico, que para cada fluxo de dólares na economia existe o requisito do fluxo de energia na direção oposta. O dinheiro é usado para comprar bens e serviços, que são necessariamente derivados da energia. Cada compra tem como contrapartida o uso de energia para produzir bens e serviços adicionais. Também observa que os grandes fluxos de energias naturais (radiação solar, vento etc), que são essenciais para a vida, não têm fluxos de dólar associados. Os custos de utilização destes fluxos de energia não entram, portanto, diretamente nas transações econômicas, conduzindo frequentemente ao seu mau uso ou à má gestão dos serviços ambientais (Cleveland, 1999; Giampietro e Mayumi, 2009).

### 2.1.2 Bioeconomia (bioeconomics)

Nos anos 70, o conceito de bioeconomia é então consolidado por Georgescu Roegen. Sua obra *“The Entropy Law and the Economic Process (1971)”* se caracteriza por abordar a economia sob a visão da Termodinâmica e apontar a necessidade da construção de uma nova visão do sistema econômico (convencionalmente entendido a partir dos fluxos monetários circulares) que considerasse a existência de fluxos físicos, materiais e energéticos. Para tanto cria, como alternativa à função de produção econômica tradicional, um modelo de fundos e fluxos, no qual incorpora em sua análise econômica o uso da terra, trabalho, tecnologia, água e energia.

*“Somente uma análise da relação íntima entre a Lei da Entropia e o processo econômico pode trazer à tona os aspectos decisivamente qualitativos desse processo, para os quais o análogo mecânico da economia moderna não tem espaço”*, Georgescu Roegen, 1971.

Georgescu crítica a visão do sistema econômico da economia neoclássica baseada em um sistema completamente circular, mecânico e autossustentável, cujos fluxos de consumo

e produção estariam contidos dentro de um sistema fechado, no qual seria incapaz de lidar com a mudança qualitativa (degradação entrópica), pois apenas abrangia os processos de locomoção, reversíveis e não qualitativos (SAES, 2013). O autor mostrar que a atividade econômica não escapa à lei da entropia: o processo econômico transforma recursos naturais de baixa entropia em resíduos de alta entropia e evolui de forma irreversível (maiores detalhes da abordagem de Georgescu será discutida na próxima seção e no Capítulo 3).

Ainda sob a ideia de que o processo econômico estaria intimamente relacionado à Lei da Entropia, destacam-se as contribuições de Ilya Prigogine. Físico-químico, laureado com Prêmio Nobel de Química em 1977, foi fundamental por sua teoria das estruturas dissipativas. O autor, assim como Georgescu, crítica o conceito de sistema econômico fechado da teoria convencional. O sistema econômico compreenderia tanto o estudo do sistema econômico em si quanto do ecossistema e, portanto, não seria isolado. Assim, foi fundamental para a análise dos sistemas abertos e fechados que operam em estados afastados do equilíbrio termodinâmico<sup>14</sup>(SAES, 2013).

### 2.1.3 Bioeconomia (*bioeconomy*)

E por fim, mais recentemente, uma nova abordagem para a bioeconomia começou a ser discutida pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) através dos documentos “*The Application of Biotechnology to Industrial sustainability (2001)*” e “*The Bioeconomy to 2030: Designing a Policy Agenda (2009)*”. Todavia, o termo deixou de representar o conceito de bioeconomia de Georgescu Roegen. O termo atual, originalmente do inglês *bioeconomy*, passou a ter como foco principal o conhecimento da biotecnologia e o uso de recursos renováveis de biomassa (CGEE, 2017).

*“A Bioeconomia se refere a produção e conversão sustentáveis de biomassa em uma variedade de alimentos, saúde, fibras e produtos industriais e energia. Biomassa renovável*

---

<sup>14</sup> Um sistema está em equilíbrio termodinâmico quando o calor no interior desse sistema está uniformemente distribuído. Sem diferenças na concentração de energia, esta não se transforma em trabalho e, portanto, não há forças capazes de alterar o estado do sistema (SAES, 2013).

*engloba qualquer material biológico seja como um produto em si ou para ser usado como matéria-prima”, BECOTEPS - Bio-Economy Technology Platforms, 2011.*

Ainda em estágio de desenvolvimento, o novo conceito de bioeconomia se encontra mais estruturado na Europa<sup>15</sup> e Estados Unidos<sup>16</sup>. Na Europa o conceito, de uma forma mais ampla, considera a atividade econômica baseada na utilização de recursos biológicos renováveis (biomassa) da terra e do mar, tais como cultivos, floresta, pesca, animais e microrganismos, resíduos e desperdícios, que podem ser transformados em alimentos, ração animal, materiais, produtos químicos, combustíveis e energia. Nos Estados Unidos, conceito definido pelo Plano Nacional de Bioeconomia, centra-se no desenvolvimento, aplicação e promoção de técnicas de biotecnologias de fronteira como: a engenharia genética, o sequenciamento de DNA, o uso industrial de enzimas e microrganismos, assim como a engenharia metabólica e biologia sintética (CGEE, 2017).

De modo a diferenciar a bioeconomia de Georgescu (*bioeconomics*) e a bioeconomia lançada pela OCDE (*bioeconomy*), alguns autores já estão denominando de a velha e a nova bioeconomia (Barros *et al*, 2007, Zawojksa e Siudek, 2016).

## **2.2 Bioeconomia de Georgescu Roegen**

Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) foi um matemático e economista romeno, sendo um dos pioneiros a investigar rigorosamente a interação entre a atividade econômica e o ambiente natural a luz dos conceitos da termodinâmica (Mayumi, 2011).

Georgescu Roegen teve duas fases em seus estudos. A fase inicial de sua carreira, voltada para a ciência tradicional, e a fase seguinte, na qual introduz o conceito de sua bioeconomia. Na fase tradicional, segue o padrão da época, com estudos matemáticos da economia no campo da teoria da utilidade e consumo, da análise input-output e da econometria. Seu artigo “*The Pure theory of consumer behaviour*” (1936) é considerado um

---

<sup>15</sup> Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. (2012). Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. European Commission. <http://doi.org/10.1089/ind.2012.1508>

<sup>16</sup> The National Bioeconomy Blueprint, 2012. Disponível em <[https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national\\_bioeconomy\\_blueprint\\_april\\_2012.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_bioeconomy_blueprint_april_2012.pdf)>

clássico por Paul Samuelson, ao escrever o prefácio do livro-coletânea “*Analytical economics: issues and problems*” (1966), no qual Georgescu reúne seus artigos da década de 1930, com os artigos da década de 1950 (sobre a teoria da escolha) e os artigos relativos a temas diversos, como o “*Economic Theory and Agrarian Economics*” sobre a economia de países agrários com alta densidade populacional (Cechin, 2008).

Na segunda fase, da publicação do clássico “*The Entropy Law and the Economic Process*” (A Lei da entropia e o processo econômico) (1971), introduz os conceitos de sua bioeconomia (*bioeconomics*), estabelece uma crítica ao excesso de formalismo matemático e tenta superar as limitações do enfoque tradicional econômico na hora de explicar o processo de produção. Para um aprofundamento da vida e obra do autor ver Carpintero (2006), Cechin (2008) e Mayumi *et al* (1999).

“...os limites de toda ciência na realidade são penumbras movediças. A física se confunde com a química, e esta com a biologia, a economia com a ciência política e com a sociologia e assim sucessivamente; existe uma química física, uma bioquímica e incluso uma economia política, apesar da nossa resistência em falar disto”. Georgescu Roegen, 1971.

Como o próprio nome da publicação estabelece, Georgescu passa a ver o processo econômico sob a luz do conceito de entropia, introduzido pela Termodinâmica. Em 1850, Rudolf Clausius, em seu artigo mais importante, publica “*Sobre a força motriz do calor e das leis de calor que podem ser deduzidas*”, no qual formaliza as leis da Termodinâmica e introduz a noção de entropia. A 1ª Lei diz que a quantidade de energia num sistema isolado é constante, enquanto a 2ª Lei diz que a qualidade da energia num sistema isolado tende a se degradar, tornando-se indisponível para a realização de trabalho (Hall, 2017).

A 1ª Lei da termodinâmica, denominada de Princípio da conservação de energia, estabelece que a energia não se cria nem se destrói, apenas se transforma. A quantidade total de energia permanece inalterada e constante, podendo se transformar de um estado para o outro, mas sem se criar ou destruir no processo. A 2ª Lei da Termodinâmica, denominada Lei

da entropia, adiciona à Lei anterior que durante o processo de transformação, a energia perde sua qualidade e se degrada (em calor), aumentando a entropia do sistema. A energia desperdiçada ou dissipada não pode mais ser usada para realizar trabalho, é considerada a produção de entropia de um sistema.

Com base nas leis da termodinâmica, Georgescu traça uma série de críticas a economia tradicional, com destaque para os seguintes pontos: i) mecanicismo, ii) reducionismo, iii) sistema econômico fechado e a iv) função de produção convencional.

### 2.2.1 *Mecanicismo*

A economia tradicional dominante no período de Georgescu é baseada no entendimento mecânico do sistema econômico. A teoria neoclássica (ou a "revolução marginalista") reduz todas as questões econômicas às questões alocativas. Baseada na obra de três economistas, William Jevons (1835–1882) - *A teoria da Economia Política* (1871), Karl Menger (1840-1921) - *Princípios da Economia Política*, e Leon Walras (1834-1910) - *Elementos da Economia Política Pura* (1872), fundamentam-se na teoria da "utilidade subjetiva" (Cechin e Veiga, 2010; Hall, 2017). O fenômeno das ‘trocas’ passa a ser o de encontrar a combinação de bens e serviços que maximizem a utilidade das pessoas dada uma restrição de recursos.

O entendimento mecânico do sistema econômico, que envolve o princípio da conservação de energia, estabelece que a energia total de um sistema físico isolado é constante. Nada se cria e ou se destrói, apenas se transforma, sem perdas. Por conseguinte, o fenômeno estudado pela Mecânica é reversível. Isso significa que ele é compreendido apenas pela posição do objeto em questão, não importando a trajetória temporal pela qual passou o objeto. Em analogia econômica, as ‘trocas’ entre indivíduos auto-interessados levariam a economia ao ‘equilíbrio’ em que todos estariam maximizando sua utilidade (Cechin, 2008).

*“Mas, assim como todas as ciências físicas têm sua base mais ou menos óbvia nos princípios gerais da mecânica, também todos os ramos e divisões da ciência econômica devem estar impregnados de certos princípios gerais. É a investigação de tais princípios — ao delineamento da mecânica do interesse individual e da utilidade*

*— que este ensaio foi dedicado. O estabelecimento de tal teoria é um preâmbulo necessário para qualquer projeto definitivo da superestrutura do conjunto da ciência” (pag 22, Jevons 1879).*

Georgescu critica a Economia Neoclássica mostrando que a complexidade de macrosistemas biológicos ou sociais não pode ser compreendida com base na abordagem mecanicista. A mecânica não leva em conta as mudanças qualitativas e irreversíveis. Aplicando as leis da termodinâmica, mostra que a aplicação e a visão mecanicista do processo econômico só são possíveis porque nesta o tempo é considerado uma variável cardinal, podendo se mover em um sentido a outro sem contradizer suas leis. Em outras palavras, as equações da mecânica são simétricas com respeito ao tempo, não existe passado nem tampouco futuro. Todavia, a economia não pode ignorar o tempo histórico, pois a produção econômica é uma transformação entrópica (Carpintero, 2006).

*“É certo que nenhum economista jamais sugeriu que um processo de produção possa inverter-se como converter móveis em árvores outra vez. Todavia, a teoria clássica dos ciclos econômicos se baseia na ideia de que todo processo econômico pode regressar a qualquer posição anterior seguindo a mesma rota em sentido contrário”.*  
Georgescu Roegen, 1974.

Georgescu se baseia na termodinâmica para definir que a evolução do processo econômico experimenta mudanças irreversíveis: “Só podemos passar por um determinado estado uma só vez, então podemos dizer que esse processo é irreversível”. A degradação entrópica é um típico processo irreversível na medida que a utilização de um hidrocarboneto em uma caldeira faz com que sua baixa entropia se perca irreversivelmente e não possa ser recuperada. Do mesmo modo, o processo econômico supõe a presença de uma mudança qualitativa tanto do ponto de vista físico como histórico (Carpintero, 2006).

### 2.2.2 *Reduccionismo*

Outra importante contribuição de Georgescu veio do fato de não ser um reducionista, isto é, não acreditar que o todo é simplesmente a soma aditiva de suas partes. Assim ao apontar os limites da análise mecânica e a necessidade de pensar o processo econômico de forma sistêmica, “fora do equilíbrio”, introduz já naquela época as chamadas abordagens da Complexidade e da Economia Evolucionária<sup>17</sup>. O contínuo processo de inovação faz do desenvolvimento econômico e histórico um processo que não é facilmente previsível. Entre eles se destaca o fato de uma inovação ser um sucesso único e irreversível, no sentido de que cronologicamente só se sucede uma vez. E como representa uma mudança qualitativa na relação dos fenômenos prévios, não é facilmente manejável nos modelos (Cechin, 2008).

### 2.2.3 *Sistema econômico fechado*

Georgescu argumenta que o sistema econômico não pode contrariar as leis da Física. Segundo o autor, a Segunda Lei da termodinâmica estabelece que o grau de degradação de um sistema isolado tende a aumentar com o tempo, impedindo a existência de moto-perpétuos (uma máquina capaz de produzir trabalho ininterruptamente utilizando a mesma energia). Da mesma forma, o sistema econômico não pode se mover para sempre sem entrada de recursos e saída de resíduos, sendo o sistema produtivo, portanto, linear e aberto, e não circular. Apesar de considerar o diagrama do fluxo circular da renda uma simplificação bastante útil do sistema econômico, Georgescu *apud in* Cechin e Veiga (2010), considera a ideia de que tanto os bens de capital, quanto a força de trabalho que são mantidos constantes não deixam de ser uma ficção, pois o processo econômico muda contínua, quantitativa e qualitativamente máquinas e equipamentos.

---

<sup>17</sup> Trata-se de uma visão do processo econômico como algo eminentemente fora-do-equilíbrio, sistêmico, deixando de lado a visão estática e reducionista do equilíbrio. Os programas de pesquisa em economia da complexidade e em economia evolucionária são complementares. Enquanto a complexidade foca na auto-organização do sistema econômico a partir da interação de elementos muito diversos, a economia evolucionária foca nos processos de seleção de algumas variedades em detrimento de outras. Ambas fazem parte de um ponto de vista fora-do-equilíbrio. Busca-se olhar os elementos de baixo para cima e perceber como as interações entre estes formam padrões e estruturas (Cechin, 2008).



#### 2.2.4 Função de produção convencional

Na teoria econômica neoclássica, a função de produção relaciona quantidades de fatores (capital ( $k$ ), trabalho ( $l$ ) e terra ( $N$ ),  $P = f(K;L;N)$ ) para maximizar o produto (função agregada), estabelecendo o conceito de substituíbilidade perfeita entre capital, trabalho e recursos naturais, isto é, que a indisponibilidade de um fator pode ser superada pela substituição do outro (efeito substituição).

Todavia, de acordo com Georgescu, os fatores de produção não são homogêneos, existe diferença de qualidade nos fatores. A substituição entre recursos naturais e capital viola o conceito de entropia, por propor a troca de fatores com qualidades distintas, e portanto, a substituição de uma matéria de baixa entropia por alta entropia no sistema. Energia e matéria de baixa entropia são os únicos insumos verdadeiros do processo econômico, sendo capital e trabalho os agentes que os transformam em um fluxo de produtos, e, ademais, também são dependentes dos recursos de baixa entropia para serem produzidos ou mantidos (Cechin e Veiga, 2010).

Sua principal contribuição para a teoria da produção, então, consiste na elaboração do modelo de fundos e fluxos, no qual os fluxos são entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) do processo produtivo e os fundos são os fatores de produção (capital, trabalho e terra) da narrativa econômica. Todavia, os fatores de produção não são mais tratados de forma homogênea e o problema não mais está na questão alocativa dos fatores para a maximização da utilidade. Os fatores passam a considerar os diferenciais de qualidade e deixam de ser substitutos perfeitos. A teoria de fundos e fluxos de Georgescu será mostrada em mais detalhes no capítulo seguinte, quando da descrição do método do MuSIASEM.

Assim, com o pensamento de Georgescu Roegen encerra-se este capítulo, que visou fornecer uma base histórico-evolutiva-conceitual da bioeconomia, de modo a introduzir alguns conceitos que serão trabalhados na abordagem do MuSIASEM, no próximo capítulo. O entendimento dos aspectos teóricos destacados neste capítulo faz-se imprescindível para aplicação da abordagem do MuSIASEM, visto que a mesma se fundamenta tecnicamente na teoria de fundos e fluxos da bioeconomia de Georgescu.

### 3 Aspectos Metodológicos

Neste capítulo na primeira parte serão discutidas metodologias disponíveis, alternativas à abordagem multi integrada. De um modo geral, trar-se-ão as vantagens e desvantagens do uso do método Insumo Produto (IP), de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e da abordagem multi integrada (nexus). Posteriormente serão apresentadas as principais ferramentas disponíveis para uma avaliação multi integrada e a escolha da abordagem MuSIASEM, para utilização neste estudo.

Na segunda parte, inicialmente será dada uma visão geral do método e, em seguida, apresentar-se-ão pontos específicos do método, a saber: a relação bioeconômica de fluxos e fundos, o diferencial de qualidade dos produtos (contabilidade energética), a abordagem para o setor energético, a estrutura de formação dos dados (definição dos níveis dos compartimentos) e a forma da consolidação dos dados em forma de matriz.

#### 3.1 Metodologias disponíveis

Como a proposta do estudo é analisar o impacto sobre o sistema (ou ecossistema) da cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário, algumas metodologias clássicas possibilitariam esta análise, com suas vantagens e desvantagens. Em Ness *et al* (2006) é feita uma ótima abordagem sobre os métodos para avaliação do tema sustentabilidade, classificando-as (vide **Anexos**) em três grupos: i) indicadores e índices, ii) avaliação de produto e iii) avaliação integrada. Seguindo esta mesma linha de agrupamento das metodologias e adaptando para a introdução da abordagem clássica econômica de Leonief, propõe-se aqui a seguinte classificação de agrupamento de metodologias:

- i) avaliação Insumo Produto,
- ii) avaliação de produto,
- iii) avaliação integrada.

Dessa forma, englobam-se as abordagens clássicas que possibilitariam uma avaliação do impacto sobre a ótica do produto (combustíveis): o método Insumo Produto (IP) com um viés econômico, o método de Análise de Ciclo de Vida (ACV) com um viés de processos e o método multi-integrado com um viés bioeconômico.

Cabe destacar que o objetivo deste capítulo é mostrar o caminho de pesquisa que a autora seguiu para definir qual método utilizaria. Não obstante a existência de diversas outras classificações e metodologias passíveis de serem aplicadas (Pfenninger *et al*, 2014; Van Beeck, 1999), de um modo geral, este estudo verificou as grandes abordagens clássicas, extensamente utilizadas em estudos econômicos-energéticos, quando o foco de análise era o estudo de um produto e seus impactos sobre o sistema em que estão inseridos. Não se pode dizer, a priori, que uma das abordagens é melhor do que a outra. Ao contrário, todas apresentam vantagens e desvantagens, de tal forma que a definição da metodologia buscou a abordagem mais adequada dentro do objetivo almejado e dos condicionantes existentes.

O enfoque ambiental de Insumo Produto é mais completo nas fronteiras do sistema, mas apresenta simplificações devido à agregação de produtos e setores e à falta de especificidade dos processos. O método ACV promove uma visão mais detalhada dos efeitos ambientais potenciais de um sistema completo associado à provisão de bens e serviços, mas deixa muitas vezes por fora de seu sistema importantes atividades econômicas. Ambos apesar de serem amplamente utilizados, carregam com si classificações e padronizações que dificultam a proposição de estruturas alternativas. Já o método multi integrado segue uma lógica mais intuitiva e com maior flexibilidade para a criação de modelos comparativos, no caso para a proposição de um modelo comparativo nas cadeias de combustíveis líquidos rodoviários.

Assim, optou-se pelo uso de um método multi integrado pela flexibilidade, simplicidade e lógica intuitiva de aplicação do método. Diferentemente dos métodos Insumo Produto e ACV, não apresenta padronizações e classificações pré-definidas, como por exemplo, as regras de contabilidade nacional e a classificação CNAE (Classificação Nacional de Atividades Econômicas) para o primeiro e as normas ISO (*International Organization for Standardization*) para o segundo. A estrutura hierárquica da abordagem multi integrada é

construída conforme objeto de estudo definido, conforme será tratado mais especificamente na seção 3.2.3.1.

### 3.1.1 Leontief (*matriz Insumo Produto*)

A análise Insumo-Produto (em inglês, *Input-Output Analysis* – IOA) é um campo da economia que analisa as inter-relações entre os setores econômicos, expressas na forma de oferta e de demanda por bens e serviços, formação de capital e a troca de renda e trabalho (Miller e Blair, 1985). É uma ferramenta econômica que utiliza dados de transações monetárias setoriais para explicar interdependências entre as indústrias em economias modernas (Lenzen, 2001).

Formulada por Wassily Leontief (1905-1999), baseou-se, sobretudo, no estudo do seu antecessor, fundador da escola Fisiocrata, Quesnay, com o *Tableau Économique*. Tomando como base a teoria do fluxo circular, preocupa-se com o problema da distribuição de renda entre as classes envolvidas dentro do processo produtivo (Guilhoto, 2009).

*“Este modesto volume descreve uma tentativa de aplicar a teoria econômica de equilíbrio geral - ou melhor, de interdependência geral - a um estudo empírico das interrelações entre as diferentes partes de uma economia nacional como revelado através da covariação de preços, produções, investimentos e rendas”* Leontief (1951, p.3) *apud in* Guilhoto (2009).

No Brasil, as Matrizes de Insumo-Produto são elaboradas a partir dos dados das Contas Nacionais do Brasil. O sistema de contas nacionais foi elaborado até 1986 pelo Centro de Contas Nacionais da Fundação Getúlio Vargas (FGV/RJ), quando a partir de então, passou a ser calculado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Em 1988, o IBGE incorporou a sua equipe os antigos técnicos da FGV criando dentro da sua Diretoria de Pesquisas o Departamento de Contas Nacionais (DECNA). Em 1990, o DECNA publicou o relatório metodológico atualizado de acordo com as últimas recomendações das Nações Unidas, expressas em *United Nations* (1968). Atualmente o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) é o órgão oficial do governo federal responsável pela elaboração das

Matrizes Nacionais de Insumo-Produto que deve estar de acordo com o Novo Sistema de Contas Nacionais (NSCN), (Montoro Filho, 1994).

Uma Matriz de Insumo-Produto é compreendida, basicamente, como uma matriz de coeficientes técnicos diretos e indiretos que apresenta o quanto determinada atividade econômica necessita consumir das demais atividades para que possa produzir uma unidade monetária adicional. A partir desta matriz é desenvolvido o modelo de Leontief que possibilita calcular a produção de cada atividade a partir de uma demanda final exógena. Numa abordagem de sistema aberto, permite que se avaliem impactos de variações de um vetor exógeno, a demanda final (Consumo das Famílias, Gasto do Governo, Investimentos, Variação de Estoques e Exportação), sobre um sistema econômico como um todo (IBGE, 2016; Machado, 2002).

Em sua versão tradicional (abordagem atividade-por atividade), o modelo de insumo-produto é formalmente expresso pela equação:

$$O = (I - A)^{-1} Y$$

onde:

O é um vetor valor da produção por atividade;  $(I - A)^{-1}$  é a chamada matriz inversa de Leontief; Y é um vetor de demanda final.

Neste modelo, a demanda final é uma variável independente (exógena), os elementos da matriz inversa de Leontief são parâmetros que representam as relações técnicas (diretas e indiretas) entre as atividades econômicas em toda a cadeia produtiva e o valor da produção por atividade é uma variável dependente. A aplicação da técnica de insumo-produto às questões ambientais permite que se rastreie num sistema econômico impactos ambientais direta e indiretamente associados a produtos demandados por usuários finais (IBGE, 2016). Para exemplos de aplicação da Matriz Insumo Produto às questões ambientais e energéticas ver Ely (2015); Zhang *et al* (2013); Choi *et al* (2010); Machado (2002).

A principal crítica à abordagem Insumo Produto está centrada no nível de desagregação e no método de agregação monetária. Apesar de a análise de insumo-produto

fornecer uma representação abrangente, sistemática e consistente de uma economia, essa técnica impõe, em geral, um nível de desagregação menor do que a análise de processo para produtos específicos.

Na tentativa de detalhar em um nível mais micro, criaram-se versões híbridas de Insumo Produto, com a conexão de tabelas físicas de contas ambientais às contas econômicas, estendendo o modelo original à contabilidade das externalidades dos produtos nos setores da economia (emissões, resíduos, poluição). Algumas das ferramentas analíticas e modelos desenvolvidos por especialistas de insumo-produto, por exemplo, foram a técnica *Structural Path Analysis* (SPA) e as técnicas de análise de composição (Lenzen, 2006).

Em uma abordagem híbrida, utiliza-se a relação produto-por-atividade para se estimar os coeficientes de Leontief (IBGE, 2016). A Tabela 3 exemplifica como fica constituída a matriz de Leontief, para o caso brasileiro, na versão produto-atividade, considerando os produtos propostos no estudo (combustíveis fósseis e biocombustíveis para o modal rodoviário). Refere-se à última Matriz Insumo Produto divulgada pelo IBGE, com ano base em 2010.

**Tabela 3: Enfoque produto-atividade – tabela de usos**

Código do produto nível 67	Descrição do produto nível 67	Consumo intermediário - milhão R\$				Demanda final - milhão R\$					
		0191-Agricultura> 9700 -Serviços Domésticos	Total do produto	Exportação de bens e serviços	Consumo do governo	Consumo das ISFLSF	Consumo das famílias	Formação bruta de capital fixo	Variação de estoque	Demanda final	Demanda total
19911	Combustíveis para aviação	0	8 789	2 733	0	0	310	0	496	3 539	12 328
19912	Gasóilcool	524	12 635	0	0	0	68 014	0	0	68 014	80 649
19913	Naftas para petroquímica	0	11 952	0	0	0	0	0	502	502	12 454
19914	Óleo combustível	51	8 123	6 933	0	0	0	0	643	7 576	15 699
19915	Diesel - biodiesel	6 017	80 096	0	0	0	3 281	0	0	3 281	83 377
19916	Outros produtos do refino do petróleo	915	131 134	2 187	0	0	20 099	0	1 909	24 195	155 329
19921	Etanol e outros biocombustíveis	84	18 846	1 805	0	0	26 090	0	645	28 540	47 386
Total		68 750	3 296 309	422 220	738 966	61 432	2 278 735	797 946	49 220	4 348 519	7 644 828

**Fonte: IBGE, 2016**

No caso, por exemplo, dos produtos ora propostos neste estudo – gasolina, diesel, etanol e biodiesel, a matriz não os disponibiliza de forma desagregada. Os produtos identificados na matriz Insumo Produto são: “diesel – biodiesel” (código 19915), “Outros produtos do refino do petróleo” (código:19916), que inclui a gasolina A e “Etanol e outros biocombustíveis” (código:19921), que soma o total de etanol hidratado, etanol anidro e biodiesel (vide Tabela 3). Dessa forma, de modo a identificar a parcela relativa aos produtos

gasolina, etanol e biodiesel, e verificar o impacto dos mesmos sobre variações na Demanda Final, faz-se necessário utilizar aproximações físicas ou monetárias, como balanços energéticos e valores de vendas dos combustíveis pelas distribuidoras para se criar indicadores de intensidade energética (R\$/t) <sup>18</sup>.

De acordo com Machado (2002), este nível de desagregação da análise insumo-produto é determinado pela escassez de informações detalhadas (quantidade “ilimitada” de produtos, em alguns casos, e sigilo empresarial, em outros) para todo o sistema econômico, e pelas complexidades de processamento do modelo, visto que a análise de insumo-produto é um modelo de equilíbrio geral. Desse modo, técnicas de insumo-produto são mais adequadas para se empreender análises de impacto abrangentes, fornecendo estimativas razoáveis ao pesquisador interessado em avaliações sintéticas, sistemáticas e consistentes.

Assim, as matrizes Insumo Produto apresentam como grande vantagem a robustez e consolidação do método. Trata-se de uma metodologia clássica amplamente utilizada por especialistas, sobretudo na área econômica. Todavia, em virtude da forte estruturação teórica (segue as recomendações do manual *Internacional System of National Accounts* 2008 <sup>19</sup>, IBGE, 2016), da extensa consolidação dos dados (tabelas de produção e consumo intermediário- Tabelas de Recursos e Usos – TRU<sup>20</sup>, IBGE, 2016) , da abordagem matemática (modelo de equilíbrio geral) e da estruturação classificatória (da correspondência das atividades da Matriz Insumo-Produto com a CNAE<sup>21</sup>), o modelo apresenta pouca flexibilidade para criação de novos parâmetros e novas estruturas de inter relações entre

---

<sup>18</sup> Para exemplo de desagregação das Contas Nacionais, ver Aragão (2005) e Machado (2002).

<sup>19</sup> <https://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/sna2008.asp>

<sup>20</sup> No Brasil, a Matriz Insumo-Produto está disponível para um total de 67 atividades e 127 produtos (IBGE, 2016). Mundialmente, as matrizes Insumo-Produto vêm sendo consolidadas no modelo EORA MRIO, um modelo integrado multiregional global (Multi-Region Input-Output-MRIO), o qual comporta atualmente aproximadamente 129 países e 120 setores (Lenzen *et al*, 2012, 2013a e 2013b). Por conseguinte, em virtude da quantidade de setores e produtos envolvidos em um modelo Insumo-Produto, faz-se necessário o uso de ferramentas de programação para que se possa trabalhar o grande volume de dados. Entre os softwares usualmente utilizados pelos especialistas no tema, tem-se o programa livre R (<https://www.r-project.org/>) e o comercial Matlab (<https://www.mathworks.com/>).

<sup>21</sup> Classificação Nacional de Atividades Econômicas. A CNAE é a classificação oficialmente adotada pelo Sistema Estatístico Nacional na produção de estatísticas por tipo de atividade econômica, e pela Administração Pública, na identificação da atividade econômica em cadastros e registros de pessoa jurídica. Atualmente o IBGE trabalha com a versão CNAE 2.0. Para acesso à classificação consultar: <http://concla.ibge.gov.br/busca-online-ctae.html?view=estrutura>

variáveis. Assim, uma análise comparativa dos combustíveis líquidos do setor rodoviário teria que seguir toda a dinâmica matricialmente do modelo, a classificação da CNAE, bem como se basear nas informações monetárias das contas nacionais. A dinâmica de impacto dos combustíveis líquidos sobre o sistema só seria passível de ser identificada através de aproximações físico-monetárias de desagregação dos dados da matriz insumo produto.

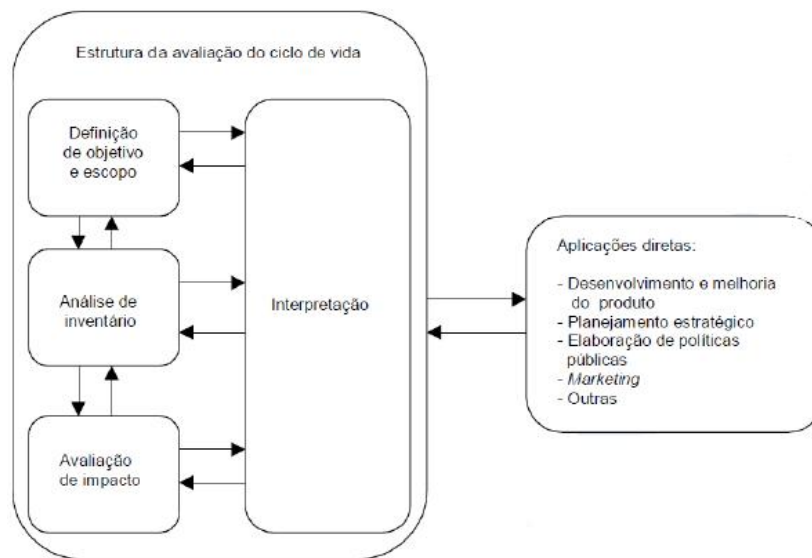
### 3.1.2 Avaliação de ciclo de vida (ACV)

A avaliação de ciclo de vida (em inglês *Life Cycle Assessment* - LCA) é uma ferramenta analítica para estimar, avaliar e interpretar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto. Na literatura especializada, utiliza-se o termo *cradle-to-grave* ou do berço-ao-túmulo, para especificar quando são consideradas todas as etapas do ciclo de vida de um produto, incluindo as etapas de uso, geração de resíduo e disposição final; ou *cradle-to-cradle* – berço-ao-berço – quando a etapa de disposição final do produto é o processo de reciclagem (Rojas, 2012).

Desde 1994, a Organização Internacional para Normalização (ISO) tem tido importante papel na padronização da metodologia ACV. Como resultado, a ACV é uma ferramenta padronizada que segue uma série de normas ISO 14040/14044, visando apoiar decisões com respeito a políticas públicas, design de produtos, compras, melhorias nos processos produtivos e projetos numa perspectiva ambiental. Além da ISO, a Sociedade de Toxicologia e Química (Setac) vem trabalhando no desenvolvimento metodológico de ACV desde 1990 e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUD) tem se focado na disseminação do uso global da metodologia desde 1995 (Rojas, 2012; Araújo, 2013).

A ferramenta possui uma estrutura técnica composta por quatro fases bem especificadas (ISO 14040): a) definição de objetivo e escopo; b) Análise do Inventário do Ciclo de Vida (*Life Cycle Inventory Analysis* - LCI); c) Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (*Life Cycle Impact Assessment* - LCIA) e d) interpretação dos resultados. A **Figura 16** apresenta um esquema da estrutura da avaliação do ciclo de vida (ISO 14040, 2006).





**Figura 16: Etapas e aplicações de uma ACV**

**Fonte: ISO 14040, 2006**

De acordo com Suh e Hupples (2009, 2005) *apud in* Rojas (2012), a Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é considerada o procedimento mais direto e trabalhoso de um estudo ACV, quando comparada com as outras etapas da metodologia. Numa descrição geral, as principais atividades de um ICV são (ISO 14040, 2006): a) construção do fluxograma de acordo com as fronteiras do sistema apontadas na definição de objetivo e alcance; b) coleta de dados para todas as atividades no sistema, com sua respectiva documentação e cálculos; e c) cálculo das intervenções ambientais do sistema com relação à unidade funcional. A modelagem do ICV pode ser atribucional, que descreve um sistema de produto e os impactos ambientais potenciais atribuíveis a seu ciclo de vida, ou consequencial, que detalha a consequência esperada de uma mudança na demanda considerando dentro de seu sistema de fronteira os processos marginais ou afetados pela mudança. Posteriormente a definição da modelagem ICV, a ISO 14044 estabelece uma ordem hierárquica de enfoques para resolver problemas de solução, denominado método de alocação ou método para solucionar problemas de multifunções ou coprodutos nos processos (Canchumani, 2013; Rojas, 2012).

Como tentativa de eliminar os problemas de truncamentos inerentes às análises de processos, e conseqüentemente, de delimitação da fronteira do sistema e relacionar todos os setores de uma economia, desenvolveu-se versões de ACV baseada na análise de Insumo Produto, como por exemplo, a avaliação de ciclo de vida de insumo-produto econômico (*Economic Input-output Life-cycle Analysis -EIO/LCA*)<sup>22</sup>. Houve então, em virtude do processo de padronização do método (normas ISO) e a expansão na quantidade e variedade de dados para avaliação e análise dos produtos, a criação de uma gama de softwares e bancos de dados que foram sendo inseridos de modo a viabilizar e otimizar as pesquisas.

Uma lista extensa de banco de dados e softwares é apresentada em sites livres (OpenLCA)<sup>23</sup>: i) Banco de dados: Ecoinvent; Idea; GaBi; Agri-footprint; Exiobase; ARVI, Agribalyse; Soca; EuGeos' 15804-IA; NEEDS; PSILCA; etc. ii) Softwares: SIMAPRO ([www.pre.nl](http://www.pre.nl)); GaBi ([www.pe-international.com](http://www.pe-international.com)); UMBERTO ([www.umberto.de](http://www.umberto.de)); CML ([www.cmlca.eu](http://www.cmlca.eu)).

Assim, o método ACV apresentam como vantagem a ampla utilização pelo mercado, com o desenvolvimento de diversos bancos de dados e softwares para atenderem as normas e padronizações das informações exigidas pelas normas ISO 14040/14044. Trata-se de uma metodologia claramente utilizada por especialistas, sobretudo na área de impacto ambiental. Todavia, em virtude da forte estruturação técnica e do rigor nos dados (ISO 14040/14044) o método deixa pouca flexibilidade para a criação e análises que fujam do escopo de suas regras. Apresenta como grande desvantagem a rigidez estrutural de análise e padronizações. Uma abordagem da cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário teria que seguir todas as normas ISO pré definidas de produtos e processos, dificultando um processo mais flexível de criação do especialista.

---

<sup>22</sup> <http://www.eiolca.net/>

<sup>23</sup> <http://www.openlca.org/lca-data/>; <https://nexus.openlca.org/>

### 3.1.3 *Análise Multi integradas (Nexus/metabolismo social)*

As denominadas abordagens multi -integradas se caracterizam pelo conceito do uso simultâneo das variáveis técnicas, econômicas, sociais, demográficas e ecológicas na análise do sistema em estudo, mesmo que essas variáveis sejam definidas em diferentes dimensões de análise e domínios não equivalentes e se refiram a diferentes níveis hierárquicos e escalas. São modelos de análise integrada para avaliação das relações de uso de variáveis como água, solo, energia e alimentos para um produto, ou um processo, ou uma atividade econômica, ou uma região, etc, conforme o escopo definido no estudo. Dada esta característica especial, estas abordagens permitem analisar, por exemplo, o nexos entre energia e alimento, considerando-se a heterogeneidade dos fatores, a dinâmica populacional, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e uso da terra em nível nacional ou sub-nacional.

O sistema de contabilidade é livre para integrar os dados que o especialista entenda como sendo os mais relevantes e/ou importantes para análise do seu objeto de estudo. Não existe uma rigidez de método, como no caso do Insumo Produto, e de normas, como no caso do ACV, para estruturação da análise do problema. A abordagem multi-integrada permite, por exemplo, integrar dados de estatísticas nacionais e/ou outros conjuntos de dados disponíveis (por exemplo, FAO Food Balance) com dados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (*Geographic Information Systems* -GIS). Integrar dados de balanços energéticos oficiais em nível nacional e/ou internacional com dados de energia proveniente de empresas locais, uma mescla de informações macro e micro (FAO,2014). Assim, apresenta como grande vantagem em relação às demais ferramentas a flexibilidade de estruturação, o que permite ao especialista utilizar seus conhecimentos teóricos e técnicos (informações adequadas e relevantes) para estruturação e análise de um problema (estudo em questão).

### 3.1.3.1 Ferramentas para análise Multi integrada

De acordo com Biggs *et al* (2015), entre as abordagens de análise multi integrada, destacam-se os seguintes: da FAO (*The Water-Energy-Food Nexus - WEF*<sup>24</sup>); do Stockholm Environment Institute - SEI (*The Water-Energy, Food Security Nexus - WEL*<sup>25</sup>); do IAEA (*Climate, Land-use, Energy, and Water Strategies – CLEW*) e do ICTA/UAB (*Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism – MuSIASEM*) (FAO, 2014; Hoff, 2011; Giampietro *et al*, 2013; Howells *et al*, 2013).

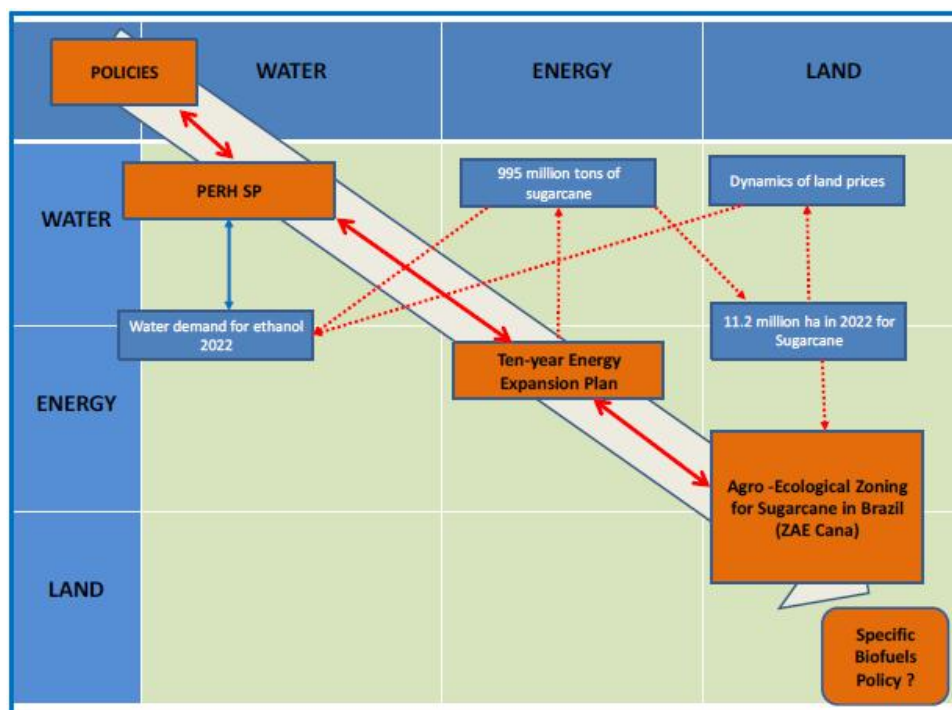
Cada um dos modelos citados anteriormente apresenta especificidades no modo de tratamento da integração das variáveis analisadas. O modelo da FAO aborda o tema sobre a ótica de segurança alimentar e sustentabilidade no uso da água e energia, definindo aspectos operacionais de sustentabilidade adaptados dos acordos internacionais sobre alimentos, energia e água: *Food Security objectives* (FAO, 1996), *Sustainable Energy for All objectives* (UN, 2012), e *United Nations-Water* (UN-Water, 2014), *apud in* FAO (2014).

O modelo do *Stockholm Environment Institute - SEI* (*The Water-Energy, Food Security Nexus WEL*) considera a interface entre as variáveis água, energia e alimentos (*water-energy; energy-land; e land-water*) e a interrelação destas com o tema de mudanças climáticas. Sob uma ótica bioeconômica, inter-relaciona as variáveis como fluxos-fluxos. Em uma aplicação para o estudo dos biocombustíveis, Maroun (2014) propõe a **Figura 17** para ilustrar a aplicação do WEL. A **Figura 17** mostra as inter-relações entre os recursos analisados (água, energia e terra), e define políticas específicas nas interseções de cada recurso, como por exemplo, políticas de irrigação (água -terra) e políticas de biocombustíveis (água-energia).

---

<sup>24</sup> <http://www.fao.org/energy/water-food-energy-nexus/water-energy-food-nexus-ra/en/>

<sup>25</sup> <https://www.sei-international.org/rio20/water-land-energy-nexus>



**Figura 17: Modelo WEL aplicado ao estudo de biocombustíveis**

**Fonte: Maroun, 2014**

No modelo do IAEA (*Climate, Land-use, Energy, and Water Strategies – CLEW*), o nexo entre as variáveis é tratado através da integração de diferentes módulos metodológicos. O aspecto relativo à energia é trabalhado no modelo LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*)<sup>26</sup>, o relativo à água no modelo WEAP (*Water Evaluation And Planning*)<sup>27</sup>, e ao uso do solo no AEZ (*Agro-ecological Zones*)<sup>28</sup>, integrados em um modelo de mudanças climáticas GCM (*General Circulation Models*)<sup>29</sup>.

<sup>26</sup> <https://www.energycommunity.org/default.asp>

<sup>27</sup> <http://www.weap21.org/>

<sup>28</sup> <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/GAEZ/>

<sup>29</sup> [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)

No modelo MuSIASEM (*Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism*), a relação entre as variáveis é estabelecida de acordo com a teoria bioeconômica de fluxos e fundos. Variáveis como água e energia são elementos de fluxo e variáveis como terra, capital tecnológico e trabalho, são elementos de fundo. Visto que esta abordagem foi a escolhida para desenvolvimento da tese, maiores detalhes serão dados na segunda parte deste capítulo (Seção 3.2).

### 3.1.3.2 Escolha da ferramenta MuSIASEM

Dentre os modelos apresentados anteriormente, a FAO não disponibiliza na íntegra a estruturação do modelo (fornece um simulador), o modelo CLEW exige a operação de 4 diferentes modelos (LEAP, WEAP, AEZ e GCM) e a abordagem WEL já foi objeto de estudo para o caso brasileiro de biocombustíveis (Maroun, 2014). Já a abordagem do MuSIASEM, além de ser inédita no Brasil, apresenta características metodológicas inovadoras que a distingue das demais abordagens multi-integradas.

O grande diferencial do MuSIASEM, baseado nas questões originalmente apontadas na bioeconomia de Georgescu Roegen, está na análise dos elementos de fluxos e fundos e na categorização dos recursos energéticos considerando os diferenciais de qualidade dos insumos (energia mecânica versus energia térmica). O MuSIASEM, em contraste com outras alternativas metodológicas, sempre caracteriza os sistemas através das relações dos fundos e fluxos com o ambiente em que estão inseridos (por exemplo, uso de mão-de-obra por unidade produtora ou por hectare, água consumida por hectare de terra em produção, energia consumida por ano per capita). Este recurso é essencial porque permite que se considerem as especificidades e a dimensão do sistema em análise. Para qualquer sistema metabólico (por exemplo, uma pessoa, uma sociedade) as relações entre fluxos e fundos específicos são definidas tanto em termos quantitativos quanto qualitativos e, portanto, os parâmetros são definidos para as relações fluxo / fundo (variáveis intensivas) de tipologias conhecidas do metabolismo (por exemplo, o rendimento típico por hectare para o etanol, da produtividade do trabalho por hora) e o tamanho relativo (variável extensiva) do sistema investigado

(quantos hectares de etanol, quantas horas de trabalho). Quanto à questão da qualidade da energia, o método aponta a necessidade de utilizar pelo menos quatro categorias distintas (vide **Figura 18**, seção 3.2.1.2) na contabilidade energética (energia primária x energia secundária; energia mecânica x energia elétrica), o que é geralmente ignorado no tratamento quantitativo da caracterização dos fluxos de energia nas outras abordagens multi-integradas.

### 3.2 Análise multi integrada do MuSIASEM

A abordagem foi criada em 1997 por Mario Giampietro e Kozo Mayumi<sup>30</sup> (Mayumi, 1999;2001) e foi sendo aperfeiçoada desde então pelos membros do grupo IASTE (*Integrated Assessment: Sociology, Technology and the Environment*) no Instituto de Ciências e Tecnologia Ambientais (ICTA) da Universidade Autônoma de Barcelona (UAB) e seus colaboradores externos.

MuSIASEM (*Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism*) (Giampietro e Mayumi, 2000a, 2000b; Giampietro *et al* 2001, 2015) é um método de contabilidade usado para analisar os ecossistemas sociais e simular possíveis padrões de desenvolvimento. Isto é, caracterizar os padrões metabólicos dos sistemas socioecológicos, como e por que os seres humanos usam recursos e como esse uso depende e afeta a estabilidade dos ecossistemas que incorporam a sociedade. É projetado para detectar e analisar padrões no uso social dos recursos e os impactos que eles criam no meio ambiente. Assim permite integrar avaliações quantitativas para diferentes tipos de análise de sustentabilidade: (i) o nexo entre consumo de alimentos, energia, água e uso da terra; (ii) metabolismo urbano; (iii) metabolismo de resíduos; (iv) metabolismo do turismo; (v) desenvolvimento rural.

Nesta linha, o MuSIASEM já foi utilizado para a avaliação integrada de sistemas agrícolas (Giampietro, 2003; Gomiero e Giampietro, 2001; Scheidel A *et al*, 2014, 2015; Arizpe *et al*, 2012; Gamboa, 2011), biocombustíveis (Giampietro e Mayumi, 2009; Borzoni, 2011), energia (Diaz-Mauri e Giampietro, 2013; Diaz-Maurin e Kovacic, 2015, Mayumi e

---

<sup>30</sup> Discípulo acadêmico de Georgescu-Roegen.

Giampietro, 2014; Sorman, 2013; Aragão e Giampietro, 2016), sustentabilidade do uso da água (Madrid-Lopez C, 2013, 2015), sistemas de gestão de resíduos urbanos (D'Alisa *et al*, 2012, Chifari *et al*, 2016; Xiao, 2015) e outros. Além disso, a metodologia também foi aplicada para avaliar o metabolismo em áreas geográficas específicas, de escala local (por exemplo, municípios chineses (Dai G *et al*, 2015); Xangai (Yangsiyu Lu *et al*, 2016)), regional (área rural de Laos (Serrano-Tovar *et al*, 2014)), e nacional (Catalunha (Ramos-Martin *et al*, 2009); China (Yong Geng *et al*, 2011); Ilhas Galápagos (Martínez-Iglesias *et al*, 2014); e outros).

Nesta seção metodológica, na primeira parte será dada uma visão geral do modelo, a saber: a base conceitual (fluxo-fundos e contabilidade energética), a abordagem para o setor energético e os principais passos para a elaboração da gramática do modelo.

### 3.2.1 Descrição do método MuSIASEM

A *Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism* (MuSIASEM) é uma abordagem contábil que integra informações quantitativas geradas por distintos tipos de modelos convencionais baseados em diferentes dimensões e escalas de análise. Baseia-se em vários conceitos inovadores derivados da Bioeconomia (vide seção 2.2) e da Teoria dos Sistemas Complexos<sup>31</sup>. A aplicação destes conceitos permite o uso simultâneo de variáveis técnicas, econômicas, sociais, demográficas e ecológicas na análise do padrão metabólico das sociedades modernas, mesmo que essas variáveis sejam definidas em diferentes dimensões de análise e domínios não equivalentes e se refiram a diferentes níveis hierárquicos e escalas<sup>32</sup>.

---

<sup>31</sup> A teoria de sistemas foi proposta em meados de 1920 pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy. Criticou a divisão das ciências em diferentes áreas, como na física, química, biologia, psicologia, etc, e propôs um estudo global, de modo a se considerar na análise todas as possíveis interdependências de cada parte com o todo, pois cada um dos elementos, ao serem reunidos para constituir uma unidade funcional maior, desenvolve qualidades que não podem ser encontradas e percebidas em seus componentes isoladamente. Basicamente a teoria de sistemas afirma que estes são abertos e sofrem interações com o ambiente onde estão inseridos. Segundo a teoria de sistemas, ao invés de se reduzir uma entidade (um animal, p ex.) para o estudo individual das propriedades de suas partes ou elementos (órgãos ou células), se deve focalizar no arranjo do todo, ou seja, nas relações entre as partes que se interconectam e interagem orgânica e estatisticamente (Bertalanffy, 1975).

<sup>32</sup> O que difere do ACV no qual a unidade funcional deve ser previamente definida.



Como ferramenta de diagnóstico, o sistema de contabilidade é utilizado para caracterizar os sistemas socioeconômicos em análise, fornecendo informações sobre (Giampietro *et al*, 2013):

1. População, mão-de-obra, capital tecnológico, terra manejada e terra disponível (definidos como elementos de fundo);

2. Energia, água, alimentos e dinheiro (definidos como elementos de fluxos). Para cada um destes fluxos são definidos o requisito total, a fração para consumo interno, as perdas, o grau de autossuficiência (suprimento interno) e as importações e exportações.

O modelo conceitual teórico de fluxo-fundo, desenvolvido por Georgescu, se encontra na base de MuSIASEM, uma vez que esse se provou extremamente útil na caracterização do padrão metabólico dos sistemas sociais. Neste modelo conceitual, os elementos de fundo são os elementos do sistema que são agentes transformadores que expressam as funções exigidas pela sociedade. Os fundos são utilizados, mas não são consumidos, eles permanecem "o mesmo" ao longo da duração da análise. Eles representam "do que o sistema é feito". Exemplos de elementos de fundo são capital humano, usos da terra e capital tecnológico. A idéia de sustentabilidade implica que estes elementos têm de ser mantidos e reproduzidos no processo metabólico durante o período da análise. Os elementos de fundo correspondem aos fatores de produção (trabalho, terra e capital) na narrativa econômica.

Elementos de fluxo, por outro lado, são aqueles elementos que aparecem ou desaparecem (i.e. seus atributos mudam) ao longo da duração da análise, como os outputs que são gerados ou os inputs que são consumidos pelo processo socioeconômico. A análise da transformação dos fluxos nos diz "o que o sistema faz" em relação ao seu contexto /ambiente (em larga escala) e no que se refere aos seus componentes internos (escala local). Exemplos de elementos de fluxo são o consumo e a produção de energia (energia fóssil, eletricidade), água (para consumo, uso doméstico, irrigação, processos), alimentos e outros.

De fato, a própria identidade de um fluxo depende do seu uso final. Por exemplo, o consumo de água potável (fluxo) pelos seres humanos (fundo) deve satisfazer certos critérios

(por exemplo, ausência de substâncias tóxicas e microrganismos nocivos) para se qualificar como tal e assim também a água de irrigação (fluxo) do solo (fundo) para o cultivo de grãos (por exemplo, nível de salinidade).

Quanto aos aspectos quantitativos, a natureza dos sistemas metabólicos permite definir, para os diversos elementos do fundo (por exemplo, seres humanos, terras de cultivo, rios), uma gama de valores admissíveis para a relação fluxo/fundo que garante a sobrevivência e a reprodução desses elementos dos fundos. Por exemplo, o cultivo de cana apresenta uma produtividade média de 70 toneladas por hectares, enquanto culturas diferentes apresentam valores diferentes de produtividade. As relações fluxo-fundo são também típicas de certos sistemas e podem caracterizar certas sociedades (por exemplo, uma sociedade baseada na agricultura ou em serviços).

Baseando-se a análise em uma abordagem metabólica de modelos de fluxo-fundo se torna possível integrar de forma coerente diversos elementos quantitativos referentes a diferentes dimensões da análise (biofísica, agronômica, econômica, demográfica e ecológica).

Em particular, de modo a interligar a visão socioeconômica e ecológica, o MuSIASEM utiliza simultaneamente duas definições complementares, mas não equivalentes de elementos para fundos, um relevante para a análise socioeconômica (atividade humana e tecnologia) e uma relevante para a análise ecológica (uso da terra /uso de água), em todos os níveis e escalas considerados (por exemplo, cultivo local, bacia hidrográfica, país). Desta forma, o MuSIASEM possibilita através de uma combinação contábil uma caracterização integrada da sociedade e seu efeito sobre o metabolismo dos ecossistemas.

#### 3.2.1.1 Fluxo/Fundos (F-F)

Na estrutura teórica do MuSIASEM, a representação de um determinado sistema se baseia na definição de dois tipos de elementos (Giampietro, 2009):

(1) Os elementos de fundo se referem aos elementos do sistema que na representação analítica se mantêm constantes - eles têm o mesmo tamanho e mesmas características no início e no final da duração da análise. Dentro do presente estudo, o conceito de fundo se refere ao uso do solo (medido em hectares) e trabalho (horas). Esses elementos são essenciais para a análise, uma vez que estabelecem a estrutura de funcionamento do sistema;

(2) Elementos de fluxo se referem aos elementos que são transformados pelos fundos, podendo entrar (input) ou sair (output) do processo em análise, tais como energia importada ou fluxos monetários. Por definição, os fluxos que entram em um sistema são diferentes dos fluxos que saem do sistema - esse metabolismo é necessário para manter a existência global e a reprodução do sistema. Dentro do presente estudo, o conceito de fluxo se refere à entrada no sistema de energia (medida em PJ térmico e PJ elétrico) e água (medida em m<sup>3</sup>).

De acordo com a abordagem do MuSIASEM, os elementos de fundo e fluxo podem ser definidos da seguinte forma:

- Fundo Tecnologia: este fundo se refere ao capital tecnológico (tecnologia ou infraestrutura) para a produção dos produtos primários (PES – *Primary Energy Sources*) e dos produtos secundários (*Energy Carriers*).

- Fundo Uso da terra (*Land Use/LU*): o termo uso da terra não reflete somente a superfície sólida da terra, pode ser entendido como a ocupação de área e os sistemas de interação da atividade humana e dos recursos ambientais. Ou os sistemas de processos biofísicos controlados pela atividade humana (*human-environment systems*).<sup>33</sup>

- Fundo Trabalho (*Human Activity/HA*): dividido em horas trabalho remunerado (Paid work sector) e não remunerado (Household sector).

- Fluxo Energia: energia (*inputs*) demandada nas atividades produtivas (produção, cultivo, colheita, refino, etc) subcategorizado por tipo de energia: (i) energia térmica (PJ-therm) e (ii) energia mecânica (PJ - electr);

---

<sup>33</sup> A definição deste conceito é importante para o Capítulo 5, quando da aplicação do MuSIASEM para a atividade *offshore* de produção de petróleo.

- Fluxo Água (*Water/W*): fluxo de água (*inputs*) demandado nas atividades produtivas e pode ser dividido em duas subcategorias: (i) água azul e (ii) água verde<sup>34</sup>;

Após definir essas categorias, define-se o padrão metabólico usando um conjunto de indicadores específicos de fluxo/fundo associados às características dos diferentes elementos de fundo. Por exemplo, no mapeamento dos fluxos relativos ao uso de terra, obtêm-se informações úteis sobre o impacto ambiental (ou limites) associado ao padrão metabólico. As características metabólicas calculadas a partir da relação fluxo/fundo são variáveis intensivas (taxas, densidades, intensidades) e são observadas no nível dos elementos individuais do fundo (grau de produtividade da cana de açúcar; eficiência dos sistemas *onshore*; etc).

### 3.2.1.2 Contabilidade energética

A contabilização de quantidades de energia (como qualquer outra contabilidade) requer a utilização de determinadas unidades de medida, como a Joule (J), quilocalorias (kcal) ou quilowatt-hora (kWh). No entanto, não necessariamente as quantidades de energia expressas numa medição podem ser somadas. Em particular, há duas distinções-chave que devem ser consideradas quando se considera a contabilização de quantidades de energia (Giampietro, 2014):

(1) Energia térmica (PJ-therm) versus energia mecânica (PJ-electr) - a diferença qualitativa entre estas duas formas de energia é o que gerou o campo da Termodinâmica, por

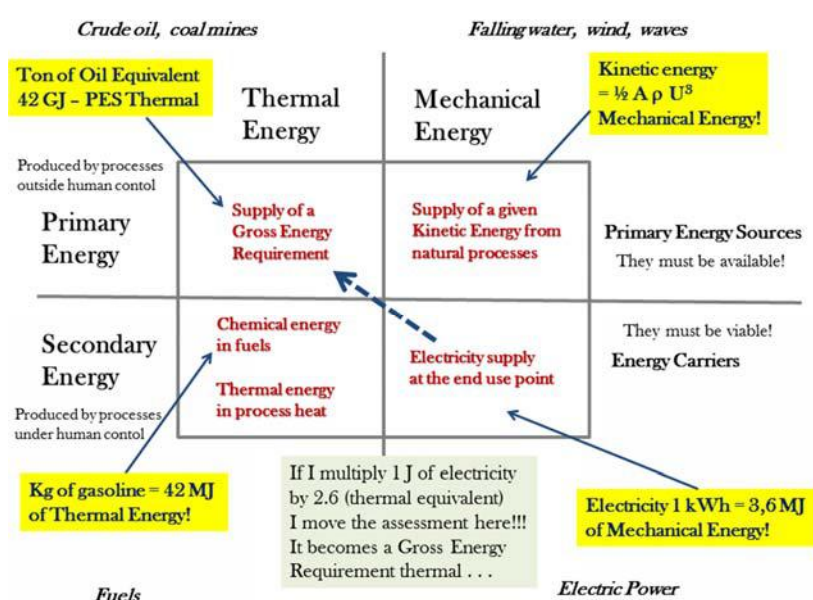
---

<sup>34</sup> A literatura especializada na temática relativa ao uso da água, denominada de pegada hídrica (*waterfootprint*), divide a água em 3 categorias: i) Água verde (*Green water*) - água de precipitação que chega à superfície terrestre e é armazenada no solo; ii) Água azul (*Blue water*) - água doce superficial ou subterrânea; iii) Água cinza (*Grey water*) - água contaminada no processo produtivo (Hoekstra, 2009). Esta última não se refere a um consumo (*input*), mas a um rejeito poluente (*output*). Assim, o MuSIASEM incorpora como elemento de fluxo (*input*) a análise da água verde e azul MAGIC (2017).

exemplo, como estudar a conversão de quantidades de energia térmica em energia mecânica e vice-versa;

(2) Energia primária (*Primary Energy Sources* -PES) versus energia secundária (*Energy Carriers* - EC).

Como definido na bioeconomia de Georgescu, o reconhecimento de uma diferença qualitativa entre estas duas formas de energia é essencial para discutir a questão energética. Assim, ao considerar estas duas distinções, estabelecem-se quatro categorias distintas que devem ser usadas na contabilidade energética, conforme ilustrado na **Figura 18**.



**Figura 18: Categorização energética no MuSIASEM**

**Fonte: Giampietro, 2016. Nota: energia primária ( *Primary Energy Sources* -PES) x energia secundária (*Energy Carriers* - EC) e energia térmica (combustíveis) x energia mecânica (eletricidade).**

No que se refere à primeira distinção entre as características de energia (térmica x mecânica), a diferença qualitativa entre estas duas formas de energia foi primeiro apontada pelos pioneiros da termodinâmica (vide 2ª Lei da Termodinâmica). A operação de um motor térmico mostra claramente a diferença em qualidade entre 1 J de energia térmica e mecânica,

uma vez que neste processo se transforma uma grande quantidade de energia térmica para obter uma pequena quantidade de energia mecânica.

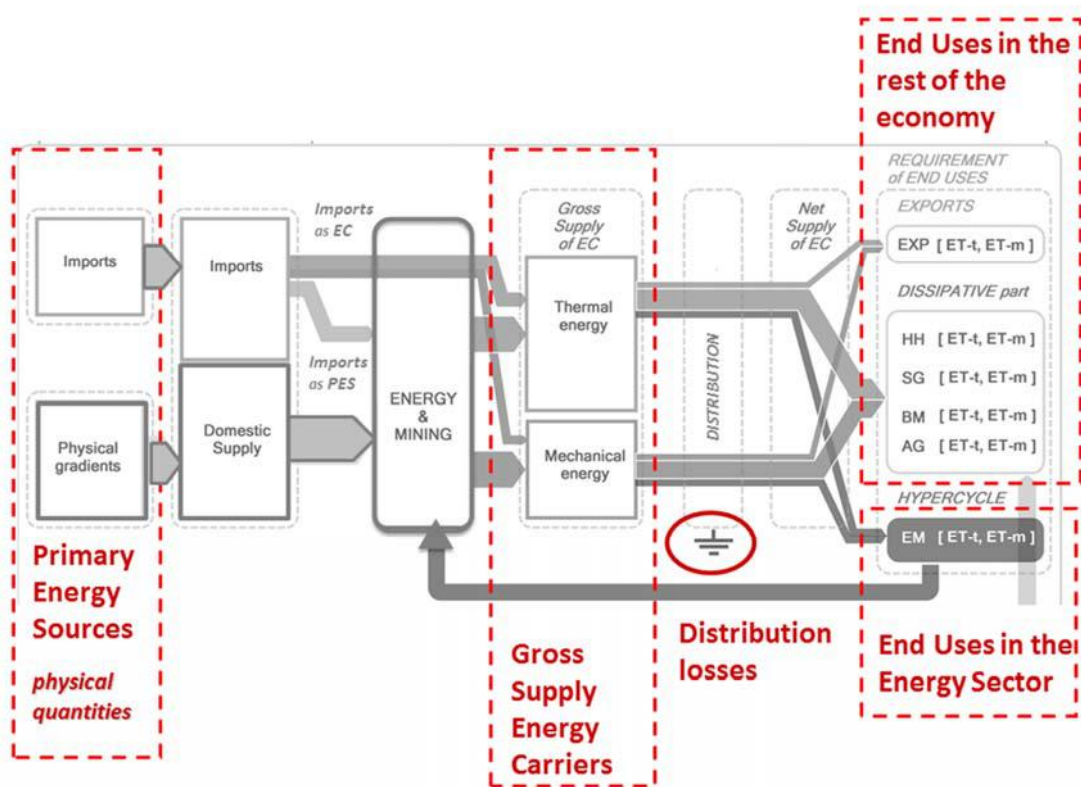
Da mesma maneira, quando da produção de energia secundária a partir de fontes de energia primária os setores energéticos sacrificam grandes quantidades de energia térmica (Joules sob a forma de energia fóssil) para produzir uma quantidade menor de Joules de eletricidade (em forma de energia mecânica). Observa-se também que quando da transformação de energia secundária em energia útil esta questão continua a ser essencial.

Quanto à segunda distinção - fontes de energia primária (PES) versus fontes de energia secundária (EC), as fontes primárias de energia são definidas como quantidades de energia produzidas por processos além do controle humano, como a energia fóssil, energia solar e energia eólica. Já a energia secundária é uma forma de energia gerada por processos humanos e alimentado por fontes de energia primárias: exemplo, litro de gasolina associado à tonelada de petróleo. Esta distinção é importante porque a produção de energia secundária requer: (i) a disponibilidade de fontes de energia primárias (por exemplo, petróleo a ser extraído); (ii) disponibilidade tecnológica dos sistemas produtivos (tecnologia necessária para extrair, transportar e converter o petróleo bruto em combustíveis); (iii) controle humano (por exemplo, trabalho); e (iv) a disponibilidade de energia (primária e/ou secundária) para ser usada no próprio processo de transformação energética (consumo próprio).

### *3.2.2 Abordagem do MuSIASEM no Setor Energético*

O setor energético é uma interface entre o consumo de energia final pelas atividades econômicas (visão interna) e os processos que determinam a disponibilidade de fontes de energia primária (visão externa). Por isso, é importante poder "visualizar" o papel da oferta interna de energia, definindo em termos quantitativos e qualitativos os vários elementos funcionais e estruturais que compõem a rede de transformações de energia. Ao adotar a abordagem MuSIASEM, esta visualização pode ser obtida desenvolvendo uma gramática

energética. A **Figura 19** ilustra um exemplo simples de gramática<sup>35</sup> construída para analisar a relação entre o setor energético e o "resto" da sociedade.



**Figura 19: Gramática do MuSIASEM para o Setor Energético**

Fonte: Diaz-Maurin e Giampietro, 2013. Notas: EC = energy carrier; EXP = export; HH = household sector; SG = service and government sector; BM = building and manufacturing sector; AG = agricultural sector; EM = energy & mining sector; ET-t = energy throughput thermal; ET-m = energy throughput mechanical)

A gramática ilustrada na **Figura 19** nos permite descrever: (i) nível de abertura do sistema (em sua interação com o contexto) considerando as importações e exportações em relação à produção interna e o consumo bruto; e (ii) a rede de transformações que ocorrem

<sup>35</sup> O termo "gramática" no MuSIASEM é utilizado para expressar a estrutura do modelo, o que engloba o conjunto de variáveis, a forma como as variáveis serão inter-relacionadas e os conceitos inerentes às mesmas.

dentro do sistema por meio do rendimento bruto (Fluxo), as perdas e o rendimento líquido em cada um dos compartimentos, individualizando desta forma a fração de energia bruta necessária para o próprio setor energético (“*hypercycle*”), por exemplo, energia secundária utilizada para produzir energia secundárias. Assim, a abordagem metodológica sob a ótica de metabolismo é caracterizada por combinar dois pontos de vista complementares: a visão externa (que estabelece os limites da oferta da energia primária) e a visão interna (transformação da energia primária em energia secundária).

Na visão externa (lado esquerdo da **Figura 19**), podemos descrever e avaliar as quantidades de energia em termos de fontes de energia primária, o que nos permite analisar a gravidade das restrições externas. Focando-se em: i) disponibilidade de recursos naturais (determinada pelos processos além do controle humano) que limitam a oferta doméstica; e (ii) processos que ocorrem fora dos limites do sistema que determinam as importações disponíveis (por exemplo, o custo das importações).

Na visão interna (no lado direito da **Figura 19**), podemos avaliar as quantidades de energia em termos de EC (energia térmica e mecânica) e analisar os fatores que determinam as restrições internas. Aqui estudam-se os processos sob controle humano, que ocorrem dentro dos limites do sistema (por exemplo, os coeficientes técnicos de processos individuais, disponibilidade dos fatores de produção) e a fração da energia necessária para a operação do setor energético.

Esta visão do MuSIASEM permite, por exemplo, identificar a parcela dos fatores de produção que são utilizados para a produção de combustíveis no uso nacional e aquela parcela destinada a exportação. Por exemplo, gasolina exportada demanda fatores de produção e a gasolina importada não demanda. O mesmo raciocínio segue para PES.

### 3.2.3 *Passo a passo para aplicação do MuSIASEM*

O MuSIASEM, diferentemente dos modelos tradicionais, como por exemplo, os Insumos Produtos e ACV, como mostrado no item 3.1, não apresenta um rigor técnico de execução. A abordagem, como assim denominada, trata-se de uma ferramenta que utiliza dos conceitos da bioeconomia para propor uma visão sistêmica do objeto de estudo. Assim, a



definição das variáveis e da estruturação da lógica de interrelação entre as mesmas, denominados no MuSIASEM de “gramática”, é definido pelo analista do problema.

Em termos práticos, a avaliação multi integrada envolve as seguintes etapas: i) definição dos compartimentos (nível de abertura do sistema), ii) definição dos fundos, iii) definição dos fluxos e iv) construção matricial.

Com relação à plataforma de execução, não existe um programa para execução do MuSIASEM. Dependendo da extensão dos dados que serão analisados, pode ser trabalhado de forma simples em uma plataforma como o Excel ou de forma mais complexa em plataformas de programação. Atualmente, a versão mais avançada da ferramenta, por envolver um projeto grande (MAGIC, 2017), está sendo expandido para a programação.

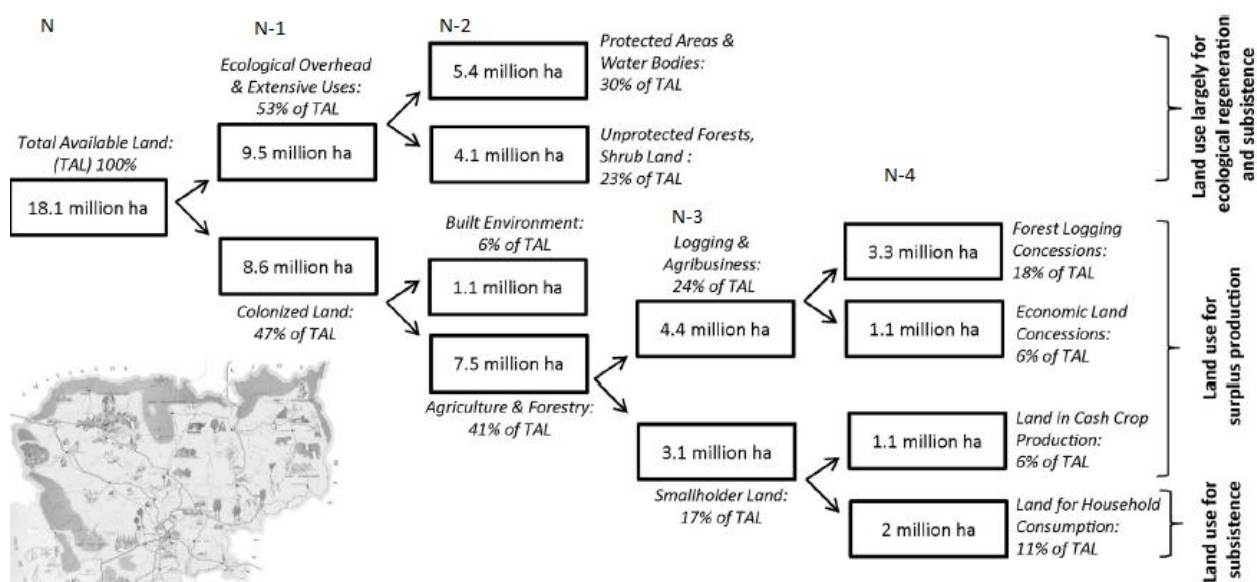
No caso específico deste estudo, foi desenvolvido na ferramenta do Excel, que foi suficiente para consolidar os dendogramas (matrizes) dos elementos de fundos e fluxos analisados.

#### 3.2.3.1 Compartimentos (*scaling-up*)

Este primeiro passo envolve a definição da estrutura hierárquica dos compartimentos funcionais da sociedade. Primeiro, define-se o sistema geral (os limites), no Nível  $n$  e, em seguida, define-se dentro deste "todo" um conjunto de compartimentos de nível inferior no Nível  $(n-1)$ . Este por sua vez pode ser subdividido (nível  $n-2$ ,  $n-3$ , etc.) dependendo do objetivo do estudo. A definição de compartimentos deve permitir o encerramento em todos os níveis e ser mutuamente exclusiva (sem dupla contagem).

A definição dos sub-compartimentos (abaixo do nível  $n-1$ ) é importante não só por destacar aspectos do funcionamento da sociedade, mas também por permitir confrontar os números macros (*top-down* baseados em estatísticas agregadas) com avaliações em escala local (*bottom-up* baseados em coeficientes técnicos ou informação local). Esta dupla verificação é essencial na análise da robustez do metabolismo dado que os compartimentos

de nível superior devem ser compatíveis com os compartimentos de níveis inferiores (Giampietro *et al*, 2013). Na **Figura 20**, mostra-se a estruturação dos compartimentos para um estudo de caso do MuSIASEM no Cambodia, desde o Nível n (total de terra disponível) até o nível n-4. Por exemplo, terra colonizada (n-1) para atividade agrícola (n-2) de propriedade de pequenos produtores (n-3) utilizada para o abastecimento das residências (n-4). No próximo capítulo, na seção 4.2 será apresentada a divisão dos compartimentos criada para avaliar a cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário.



**Figura 20: Exemplo de compartimentação (definição dos níveis) no estudo de caso do MuSIASEM no Cambodia**

Fonte: Sheidel, *et al*, 2013.

### 3.2.3.2 Definição dos elementos de fundo

Esta etapa envolve a seleção dos elementos de fundo relevantes para o objeto de estudo e a sua quantificação em vários compartimentos funcionais do sistema. Deve-se selecionar dentre os três elementos de fundo – tecnologia, terra e atividade humana, e avaliar sua alocação sobre os vários setores socioeconômicos da sociedade. Este passo tipicamente

resulta na geração de dendrogramas em que a quantidade total do elemento de fundo atribuído a toda a sociedade (em um ano) é repetidamente dividida à medida que se avança para baixo em sua estrutura hierárquica (n-1). Por exemplo, no caso do elemento de fundo HA (Human Activity), o qual é medido em horas de trabalho (h), uma representação para país seria:

$$THA = P * (PW * 1920^{36}) + (HH * 0)$$

Onde, THA= Total Human Activity; P = Population; PW = Paid work sector, HH = Household sector (não produtiva).

O total de horas trabalhada (THA) de um país seria o equivalente a população economicamente ativa, considerando a parcela das pessoas empregadas e com uma atividade econômica remunerada (produtiva). No caso do estudo da tese, por exemplo, a atividade humana será relativa ao número de horas de trabalho dos empregados dos setores produtivos do setor petróleo e de biocombustíveis. Claramente, a profundidade do dendrograma depende do objetivo do estudo e da disponibilidade de dados para o elemento do fundo em questão.

### 3.2.3.3 Definição dos elementos de fluxo

Este passo envolve a definição e quantificação dos vários fluxos - alimento, energia, água, dinheiro que serão utilizados pelos elementos de fundo selecionados. Para isso, o MuSIASEM faz uso de uma série de gramáticas que descrevem os loops internos associados à oferta e ao consumo dos vários fluxos. No caso por exemplo do elemento de fluxo energia, como demonstrado na seção 3.2.2 e **Figura 19**, o uso do fluxo de energia para a própria produção de derivados de petróleo, que seria o consumo próprio do setor energético (*Hypercycle*). Isto é, a parcela do fluxo que deve ser investido em sua própria produção. Isso diz respeito especificamente ao padrão metabólico de energia onde uma fração do suprimento líquido é consumida internamente pelo compartimento que produz o próprio fluxo.

---

<sup>36</sup> Total de horas trabalhadas, considerando uma média de 40 horas semanais, 48 semanas de trabalho e 4 semanas de férias.

### 3.2.3.4 Consolidação matricial (*Matriz Multi level*)

A matriz de consolidação dos resultados considera todos os pontos levantados anteriormente: a relação de fluxo-fundos, a contabilidade energética e a definição do nível e subníveis dos compartimentos. A **Figura 21** fornece um exemplo simplificado descrevendo a construção da matriz para o padrão metabólico de energia da Espanha. Este exemplo destaca o nexo entre energia (um elemento de fluxo), tecnologia ou capital tecnológico (um elemento de fundo) e atividade humana (um elemento de fundo). O uso desses três fatores de produção é mostrado simultaneamente em diferentes níveis hierárquicos de análise (n, n-1, ..., n-4), de tal maneira que os compartimentos mostrados respeitam a condição de fechamento.

	Production Factors (flow and fund elements)			Metabolic Characteristics (flow/fund ratios)		Level of analysis
	Energy throughput (GJ)	Human activity (h)	Power capacity (kW)	Exosomatic metabolic rate (MJ/h)	Power capacity intensity (MJ/kW)	
Whole Society	148	8,760	23.8	17	6.2	n
Household Sector	39	7,825	17.7	5	2.2	n-1
Service & Government	50	598	5.0	84	10	n-2
Building & Manufacturing	42	280	1.2	150	35	n-3
Agriculture	4.0	48	0.3	33	13	n-4
Energy & Mining	12.5	8	0.4	1550	31	n-4

**Figura 21: Matriz multi-level no estudo de caso do MuSIASEM na Espanha<sup>37</sup>**

**Fonte: Giampietro e Bukkens, 2015.**

<sup>37</sup> Com base no conceito proposto por Lotka (1956), Georgescu-Roegen propôs que as sociedades modernas expressem duas formas distintas de metabolismo: (i) metabolismo endosomático- refere-se à energia alimentar convertida no interior do corpo humano para preservar e sustentar a atividade fisiológica dos seres humanos, que, por sua vez, são usadas para preservar e expressar elementos estruturais e funcionais da sociedade, (ii) o metabolismo exosomático refere-se à energia convertida fora do corpo humano, mas sob controle humano, com o objetivo de amplificar o resultado do trabalho útil associado à atividade humana (por exemplo, uso de tratores, derretimento de metais, energia animal). No caso do MuSIASEM, também definido no Setor Energético como visão externa e visão interna.

Este capítulo finaliza, então, após apresentar os principais aspectos teóricos e práticos da abordagem MuSIASEM, que será aplicada no capítulo seguinte. A abordagem de fundo e fluxos, a contabilidade energética, a visão do setor energético e o passo-a-passo básico de execução. No próximo capítulo, todos estes aspectos serão aplicados à cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário.

## **4 Aplicação do MuSIASEM para a cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário**

### **4.1 Escopo do trabalho**

Antes de iniciar a implementação do MuSIASEM, o primeiro passo é definir o escopo do estudo. Como já mencionado anteriormente, será feita uma avaliação comparativa da cadeia de combustíveis líquidos no transporte rodoviário, a saber: gasolina, diesel, etanol e biodiesel. Para tanto, utilizou-se o ano de 2015 como ano base do estudo.

Serão analisados os seguintes sistemas energéticos: petróleo, biomassa de cana de açúcar e biomassa de soja. A aplicação ao setor petróleo se destina à análise da gasolina A e do diesel mineral A. A aplicação à biomassa se destina à análise dos biocombustíveis etanol anidro e hidratado (de cana de açúcar) e do biodiesel (de soja).

No que se refere à cadeia de combustíveis, o estudo proposto irá dividir a cadeia em 4 etapas (processos): i) produção da matéria-prima que dará origem ao combustível; ii) transporte dos recursos primários aos centros de transformação; iii) transformação dos recursos primários em combustíveis líquidos; iv) transporte dos combustíveis líquidos rodoviário.

A seção a seguir irá abordar a estruturação da cadeia de combustíveis sob a ótica do MuSIASEM.

### **4.2 Aplicação do MuSIASEM à cadeia de combustíveis líquidos rodoviário**

De modo a representar as 4 etapas da cadeia de combustíveis líquidos rodoviário, sob a ótica de sistema energético do MuSIASEM, conforme apresentado na seção 3.2.2, **Figura 19**, tem-se:

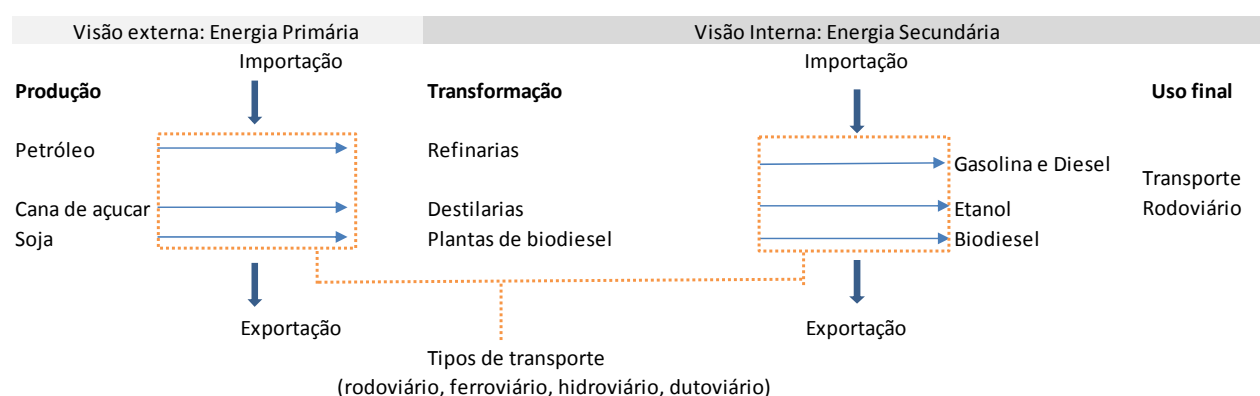
Etapa 1: Produção da Energia Primária (Primary Energy Source - PES)

Etapa 2: Transporte (#1) da Energia Primária,

Etapa 3: Produção da Energia Secundária (Energy Carriers - EC),

Etapa 4: Transporte (#2) da Energia Secundária.

A **Figura 22** mostra o esquema da cadeia dos combustíveis sob a ótica externa e interna de sistema energético do MuSIASEM. Adotando a visão externa, consideram-se três fontes de energia primária em termos de fornecimento biofísico<sup>38</sup>: i) toneladas de petróleo, ii) toneladas de cana-de-açúcar; e iii) toneladas de soja. Adotando a visão interna, considera-se a produção de quatro fontes de energia secundária: i) m<sup>3</sup> de gasolina, ii) m<sup>3</sup> de diesel, iii) m<sup>3</sup> de etanol anidro e hidratado e iv) m<sup>3</sup> de biodiesel.



**Figura 22: Cadeia de combustíveis proposto MuSIASEM**

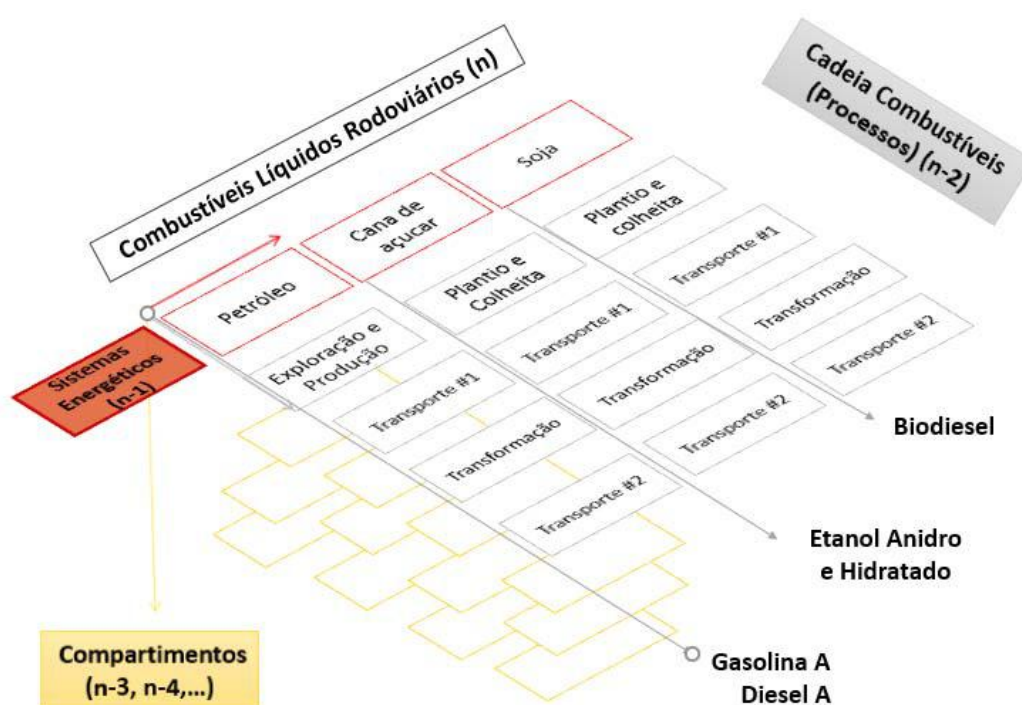
**Fonte: Elaboração própria.**

Na **Figura 22** observa-se na visão externa (lado esquerdo), as quantidades de energia associadas à energia primária doméstica e importada, e na visão interna (lado direito), as quantidades de energia associadas à energia secundária produzidas dentro do sistema e importadas.

Para a aplicação do MuSIASEM, conforme definido na seção 3.2.3, a primeira fase se refere à definição dos compartimentos ou os níveis de abertura dos dados em questão ( $n$ ,  $n-1$ ,  $n-2$ , ...). No caso do tema proposto, da cadeia de combustíveis líquidos rodoviário, os

<sup>38</sup> Uma das grandes características do MuSIASEM é trabalhar com as unidades físicas dos produtos primários, haja visto sua crítica aos indicadores médios de conversão para equivalência energética. Em sua crítica ao método EROI (*Energy Return On the Investment*), cujo o resultado é avaliado pelo indicador de joules fornecidos pelos joules consumidos, mostra a falta de informação para a análise da qualidade dos diferentes insumos (o “investimento energético” é uma mistura de energia mecânica e térmica e uma mistura de fontes de energia primária e secundárias); e da escala do processo (o EROI é uma simples razão que não fornece qualquer informação sobre a quantidade de energia associada ao tamanho do processo).

compartimentos serão definidos para os três sistemas energéticos: petróleo (gasolina e diesel), cana de açúcar (etanol anidro e hidratado) e soja (biodiesel). Cada sistema energético terá as 4 etapas da cadeia produtiva (processos): 1- Produção; 2- Transporte (#1), 3- Transformação e 4-Transporte (#2). A **Figura 23** ilustra como fica a estruturação da gramática do MuSIASEM.



**Figura 23: Estruturação da cadeia de combustíveis rodoviários no MuSIASEM**

**Fonte: Elaboração própria.**

A **Figura 23** mostra o limite do sistema no Nível n (combustíveis líquidos rodoviários) e em seguida o conjunto de compartimentos de nível inferior. No Nível n-1 os sistemas energéticos (petróleo, cana de açúcar e soja), no Nível n-2 as quatro etapas da cadeia produtiva (processos) e nos níveis inferiores n-3, n-4, os compartimentos específicos para cada combustível em análise (que será precisado mais adiante).



Na fase seguinte, selecionam-se os elementos de fundo e fluxo que serão considerados no objeto de estudo. Serão abordados os fundos capacidade produtiva (*Power Capacity/PC*), terra (*Land Use/LU*) e trabalho (*Human Activity/HA*) e os fluxos energia (*PJ-therm* e *PJ elec*) e água (*Water/W*).

#### 4.2.1 *Premissas para adaptação do MuSIASEM à cadeia de combustíveis*

De modo a adaptar a abordagem do MuSIASEM ao escopo deste trabalho algumas premissas e/ou adaptações tiveram que ser incorporadas. Por se tratar de uma análise de cadeia, de modo a garantir uma uniformização dos dados (conceitos e unidades) e garantir a consolidação matricial do dendograma dos fundos e fluxos, as seguintes premissas foram incorporadas:

- 1- Fundo Capacidade produtiva: este fundo será entendido como a capacidade total de produção (produção potencial) do sistema;
- 2- Fundo Trabalho: Para o cálculo do número de horas trabalhadas, será considerado um calendário de 224 dias úteis, com 8 horas/dia.
- 3- Fluxo Água: de modo a uniformizar a análise deste fluxo nas diferentes etapas produtivas (produção e transformação), será considerado apenas o consumo de água azul (água doce superficial ou subterrânea).<sup>39</sup>
- 4- Etapas de Transporte #1 (PES) e #2 (EC):
  - i) Fundo terra: a análise deste fundo fica comprometida quando da ótica do transporte e não será considerada. Diferente das etapas de produção e transformação, que são atividades estacionárias, e portanto, permitem uma mensuração da área de uso, o transporte envolve movimentação de cargas e uso compartilhado da infraestrutura. À exceção dos modais dutoviário e ferroviário, que contam com uma rede fixa instalada, os modais aquaviário e

---

<sup>39</sup> Vide conceituação teórica na seção 3.2.1.1. A inclusão da água verde na análise do MuSIASEM é feita quando da comparação, por exemplo, de diferentes culturas ou regiões no NÍVEL N, na qual haveriam condições semelhantes para a análise de uso da água. Neste estudo, por se tratar de uma análise de cadeia, engloba atividades industriais e agrícolas na etapa 1 e atividades industriais na etapa 2.

rodoviário são transportes definidos de acordo com o plano logístico de entrega (urbana e rodoviária) dos produtores.

- ii) Fluxo água: de acordo com a literatura especializada (King e Webber, 2008), o volume de água consumido nas atividades de transporte da energia primária e transporte da energia secundária são desprezíveis e, portanto, podem ser desconsiderados.

5- Etapa de Transporte #2 (EC): no caso específico da Etapa 4 (nível n-2), adotou-se como premissa a entrega dos combustíveis até as bases primárias<sup>40</sup> de distribuição. Isso porque, é para o mercado primário que será transferido todo o combustível que será demandado pelo consumidor final e onde serão feitas as misturas dos combustíveis gasolina A/etanol anidro e diesel/biodiesel. Ademais, e não menos importante, trata-se de uma análise de logística de entrega de combustíveis extremamente complexa, fugindo ao escopo do trabalho<sup>41</sup>. Devido à grande pulverização e capilarização de entrega (vide ANP, 2015), estudos importantes, como por exemplo, os Planos Decenais elaborados pela EPE, adotam este truncamento metodológico, de interromper a análise nas bases primárias (EPE, 2017).

No caso da Capacidade Produtiva, em termos gerais metodológicos, a abordagem do MuSIASEM incorpora em sua análise a interdependência dos elementos de um organismo, de modo que se constituem em uma unidade funcional (vide Capítulos 2 e 3). Assim, no conceito de capacidade produtiva são considerados integralmente todos os fundos e fluxos associados às atividades produtivas. Toda a energia, água, mão de obra e terra associada ao funcionamento das atividades de produção/transporte dos recursos primários e produção dos combustíveis. Todavia, para aplicação do MuSIASEM sob a ótica de cadeia, deve-se ter em

---

<sup>40</sup> As bases de distribuição representam os centros de distribuição de combustíveis e assumem o papel de armazenagem dos produtos. Segundo definição da ANP (2016), uma base de distribuição é uma instalação apta a receber, armazenar e distribuir derivados de petróleo, etanol, biodiesel, mistura óleo diesel/biodiesel, especificada ou autorizada pela ANP, de refinarias, UPGNs e terminais de armazenamento por transporte rodoviário, ferroviário, aquaviário ou dutoviário. A distinção entre Bases Primárias e Secundárias está no ponto de origem do produto. Caso a fonte supridora seja uma refinaria ou terminal, a base é Primária. Caso a fonte de suprimento seja uma base primária, a base receptora é secundária.

<sup>41</sup> No caso da biomassa se adiciona uma otimização logística em razão do escomaneto da safra, que leva em conta fatores como perecibilidade dos produtos e sazonalidade da produção por diferentes regiões geográfica (Meurer e Lobo, 2015).

consideração que uma parcela expressiva dos recursos primários não tem como destino final a produção dos combustíveis rodoviários, fazendo-se necessária uma adaptação. Dessa forma, as produções físicas (Etapa 1) e as quantidades transportadas (Etapa 2) dos recursos petróleo e biomassa de cana de açúcar e soja serão ponderados de modo a representarem a parcela destinada exclusivamente à produção de gasolina/diesel, etanol e biodiesel. Isto porque existe uma parcela dos recursos que é destinada à exportação (sobretudo soja e petróleo) e uma parcela que é destinada a outros usos (como por exemplo, petróleo para produção de outros derivados, cana de açúcar para a produção de açúcar e soja para a produção de farelo de soja). Para tanto, será aplicado à capacidade produtiva um fator de utilização (*load fator*) dos combustíveis rodoviários. Basicamente se considera na fase de transformação (etapa 3) o peso<sup>42</sup> dos combustíveis gasolina e diesel (60,10%) na produção total de derivados e o peso do etanol (56,87%) na produção de etanol e açúcar. A partir de então, determina-se o equivalente em petróleo e cana de açúcar produzidos (etapa 1) e transportados (etapa 2). No biodiesel se considera nas etapas 1 e 2 o equivalente de soja destinado à produção do óleo bruto de soja (8,3%). O resultado da aplicação do *load factor* à capacidade produtiva irá definir a produção efetiva (PE) do sistema (exclusiva para os combustíveis rodoviários), e os usos de terra, trabalho, água e energia serão recalculados nas mesmas proporções.

A seguir será apresentada a aplicação do MuSIASEM para a cadeia de combustíveis líquidos rodoviários. Primeiro será mostrada a gramática do MuSIASEM para os setores energéticos (petróleo e biomassa), caracterizando a definição dos compartimentos (nível n, n-1, n-2, etc). Na sequência será feita a aplicação numérica para cada um dos setores energéticos, caracterizando as 4 etapas produtiva com os dados de fundos (capacidade produtiva, terra e trabalho) e fluxos (energia e água). Cabe destacar que neste capítulo será apresentada a capacidade produtiva no conceito original de sistema (produção/transporte total dos sistemas energéticos de petróleo e biomassa de cana de açúcar e soja), sendo o *load factor* (fator de utilização ou o peso dos combustíveis rodoviários) aplicado no capítulo seguinte, quando da consolidação e apresentação dos resultados.

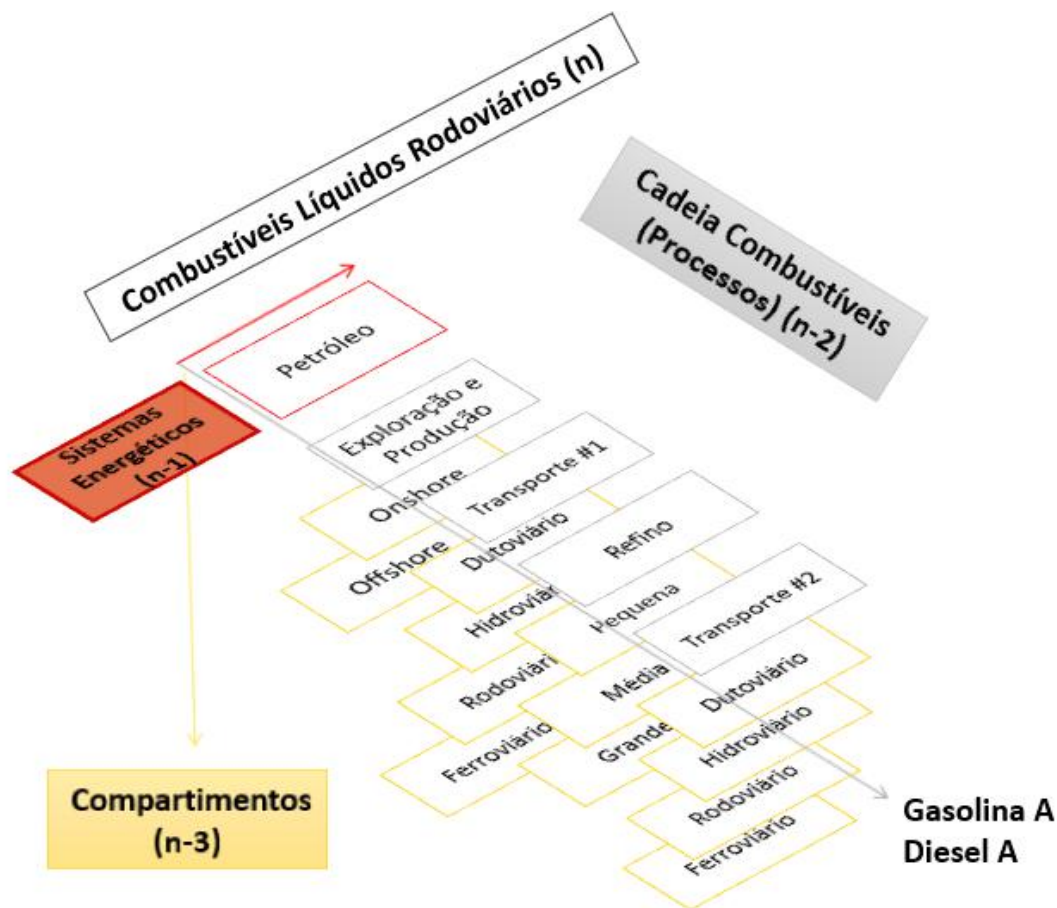
---

<sup>42</sup> Em base energética (Tep).

### 4.3 Aplicação do MuSIASEM ao Setor de Petróleo

#### 4.3.1 Desenvolvimento da Gramática do Setor Petróleo

A **Figura 24** mostra a definição dos compartimentos para o setor petróleo. Respectivamente, Nível n, combustíveis líquidos do transporte rodoviário (neste caso, gasolina e diesel); Nível n-1, o sistema energético em análise (neste caso, o Petróleo); Nível n-2, as etapas envolvidas na cadeia produtiva (processos); e Nível n-3, detalhamento dos processos (varia conforme especificidades do sistema energético em análise).



**Figura 24:** Estruturação do setor petróleo no MuSIASEM

Fonte: Elaboração própria.

Sob a ótica da cadeia (nível n-2), as etapas (processos) são apresentadas da seguinte forma: Etapa 1 - exploração e produção de petróleo, subdividida em atividades *offshore* e *onshore* (nível n-3); Etapa 2 - transporte de petróleo até as refinarias, subdividida por tipo de modal (n-3); Etapa 3 – refino, subdividida por grupo de refinarias (pequenas, médias e grandes) (n-3) e por unidade de refino (n-4); e a Etapa 4 -entrega dos combustíveis gasolina e diesel, analisada por tipo de modal (n-3). A tabela a seguir mostra em detalhes todos os compartimentos considerados no estudo.

**Tabela 4: Definição dos compartimentos para o setor de petróleo**

NÍVEL n	<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO</b> <b>GASOLINA/DIESEL</b>
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b> <b>PETRÓLEO</b>
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b> <b>EXPLORAÇÃO/PRODUÇÃO</b>
NÍVEL n-3	ONSHORE OFFSHORE
	<b>TRANSPORTE #1</b>
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO HIDROVIÁRIO RODOVIÁRIO FERROVIÁRIO
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>
NÍVEL n-3	PEQUENA < 5mil m³ MÉDIA 5-10 mil m³ GRANDE > 10 mil m³
NÍVEL n-4	Manguinhos (RJ) Rio-grandense (RS) Lubnor (CE) Recap (SP) Reduc (RJ) Refap (RS) Regap (MG) Reman (AM) Repar (PR) Replan (SP) Revap (SP) Rlam (BA) RPBC (SP) RPCC (RN) Rnest (PE) Univen (SP) Dax Oil (BA)
	<b>TRANSPORTE #2</b>
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO HIDROVIÁRIO RODOVIÁRIO FERROVIÁRIO

**Fonte: Elaboração própria**

#### 4.3.2 Aplicação numérica ao Setor de Petróleo

A produção dos combustíveis gasolina A e diesel A passa pelas seguintes etapas: i) exploração e produção de petróleo; ii) transporte do petróleo para as unidades de refino; iii) produção da gasolina A e diesel A e iv) entrega da gasolina A para mistura com o etanol anidro e entrega do diesel A para mistura com o biodiesel.

A seguir são apresentados, para cada etapa, os fundos capacidade produtiva, terra e trabalho e os fluxos energia e água.

##### 4.3.2.1 Etapa 1: Exploração e produção de petróleo

###### Fundo: Capacidade Produtiva

Considerando informações em ANP (2016), em 2015 a produção total de petróleo foi de 125 milhões toneladas, sendo 8,2 milhões t em campos *onshore* (7%) e 116,8 milhões t (93%) em campos *offshore*. A **Tabela 5** mostra o histórico da produção de petróleo, por área (mil toneladas).

**Tabela 5: Localização da produção de petróleo (terra e mar), de 2000 a 2015**

Localização	Produção de petróleo (mil toneladas)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Brasil</b>	<b>88.374</b>	<b>89.670</b>	<b>93.220</b>	<b>100.051</b>	<b>105.402</b>	<b>108.004</b>	<b>106.028</b>	<b>103.822</b>	<b>115.658</b>	<b>125.038</b>
<i>Onshore</i>	9.956	9.823	9.323	9.201	9.272	9.338	9.282	8.980	8.654	8.203
<i>Offshore</i>	78.418	79.847	83.896	90.851	96.130	98.666	96.746	94.842	107.004	116.835

Fonte: ANP, 2016

###### Fundo: Terra

No caso específico da exploração de petróleo, a estimativa do “uso de terra” ou área ocupada, seguindo o conceito abrangido pelo MuSIASEM (seção 3.2.1.1) de um sistema biofísico controlado pela atividade humana, definiu-se como variável de *proxy* para a área ocupada a área relativa ao Campo de petróleo. Considerando-se as definições em ANP (2016)

para Bloco<sup>43</sup> e Campo<sup>44</sup>, optou-se como *proxy* a área relativa ao Campo, que corresponde efetivamente à área produtiva onde são instalados os equipamentos destinados à produção. A **Tabela 6** mostra a área ocupada pelos campos produtores em 2015, num total de 27,3 mil km<sup>2</sup> (2,7 milhões hectares), sendo 6,9 mil km<sup>2</sup> (0,7 milhões hectares) em região *onshore* e 20, 3 mil km<sup>2</sup> (2,0 milhões hectares) em região *offshore*.

**Tabela 6: Área concedidas, blocos e campos em produção (terra e mar), 2015**

Outorgas Set/2015	Terra		Mar		TOTAL	
	n°	km <sup>2</sup>	n°	km <sup>2</sup>	n°	km <sup>2</sup>
Blocos	199	166.973	125	74.199	324	241.171
Campos	295	6.946	143	20.313	438	27.259

**Fonte: MME, 2015**

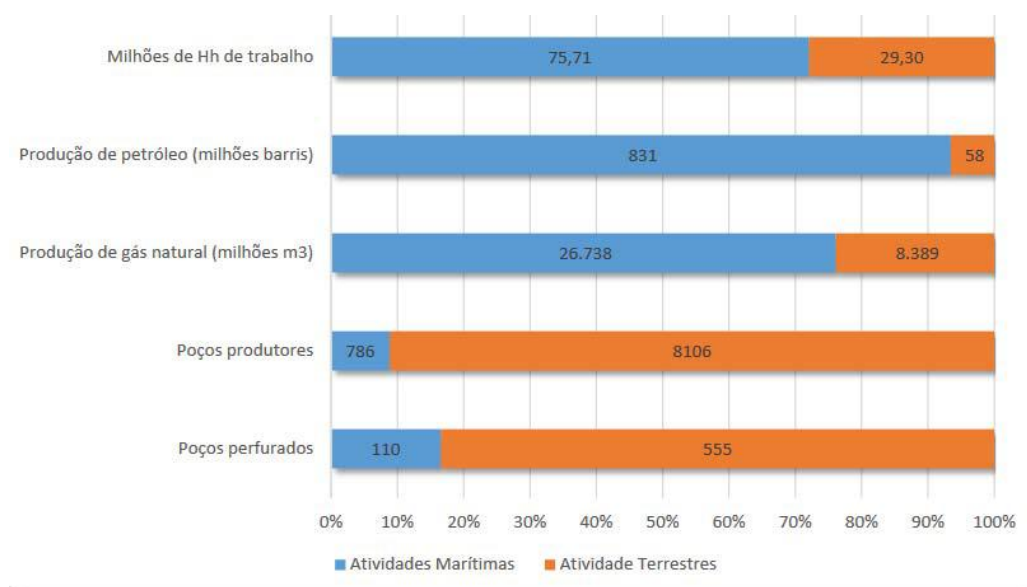
#### Fundo: Trabalho

Nas atividades de exploração e produção de petróleo, os valores de homem-hora trabalhados na produção de petróleo *onshore* e *offshore* pela Concessionária Petrobras são apresentados na **Figura 25**. No ano de 2015 foi um total de 105,1 milhões de horas de trabalho, sendo 29,30 milhões de horas (27,9%) nas atividades *onshore* e 75,71 milhões de horas (72,1%) nas atividades *offshore*.

<sup>43</sup> Bloco: parte de uma bacia sedimentar, formada por um prisma vertical de profundidade indeterminada, com superfície poligonal definida pelas coordenadas geográficas de seus vértices, onde se desenvolvem atividades de exploração ou produção de petróleo e gás natural. Lei nº 9.478, de 6/8/1997 (ANP, 2016).

<sup>44</sup> Campo de Petróleo ou de Gás Natural: área produtora de petróleo ou gás natural, a partir de um reservatório contínuo ou de mais de um reservatório, a profundidades variáveis, abrangendo instalações e equipamentos destinados à produção. Lei nº 9.478, de 6/8/1997.





**Figura 25: Horas trabalhada produção petróleo (mar e terra)**

**Fonte: ANP, 2015**

Estes valores foram extrapolados para o total de empresas em atividade em exploração e produção de petróleo no país. Considerando que em 2015 a Concessionária Petrobras representou 83,5% da produção total do país (ANP, 2016), estimou-se um total de 125,7 milhões de horas trabalhadas na atividade de exploração e produção de petróleo no país.

#### Fluxo: Energia

O consumo energético de equipamentos estacionários como motores, turbinas, caldeiras e aquecedores é atendido majoritariamente pelo gás natural<sup>45</sup>. Existe ainda um consumo, pequeno, de óleo diesel, sobretudo para a geração de eletricidade (Blanco, 2016). Como premissa para o consumo energético na exploração e produção de petróleo, considerou-se o consumo próprio de gás natural nos campos de petróleo e petróleo com gás natural associado, disponível em ANP (2016). Em 2015, estimou-se um consumo próprio de 178 PJ-therm, sendo 18PJ em área *onshore* (10,1%) e 160 PJ em área *offshore* (89,9%)<sup>46</sup>. De

<sup>45</sup> Uma outra parcela do gás natural é utilizada para fins não energéticos, como queima e reinjeção.

<sup>46</sup> Coeficientes de equivalência 41,48 GJ/m<sup>3</sup> (EPE, 2016).

acordo com EPE (2016)<sup>47</sup>, o consumo próprio de diesel foi de 882 mil m<sup>3</sup> (31,32 TJ)<sup>48</sup>. A **Tabela 7** mostra os dados de consumo próprio de gás natural e diesel para o ano de 2015.

**Tabela 7: Consumo próprio nas atividades de E&P de petróleo, 2015.**

Consumo próprio					
	Gás natural		Diesel		Total
	mil m <sup>3</sup>	PJ	mil m <sup>3</sup>	PJ	PJ
Brasil	4.281.669	178,03	882	0,03	<b>178,06</b>
Onshore	433.980	18,04	57,89	0,00	<b>18,05</b>
Offshore	3.847.689	159,99	824,5	0,03	<b>160,02</b>

**Fonte: Elaboração própria a partir de ANP, 2016 e EPE, 2016.**

### Fluxo: Água:

Como apontado no item 4.2.1, nesta etapa de produção não há o consumo de água azul. Todavia, para efeito de registro e caso o leitor tenha interesse em considerar em suas análises o consumo de água não descartada (reinjeção e dessalinização), ver em **Anexos** os indicadores de consumo de água nas atividades *onshore* e *offshore* e o volume total consumido estimado<sup>49</sup>.

#### 4.3.2.2 Etapa 2: Transporte #1

### Fundo: Capacidade Produtiva

A produção de petróleo *offshore* e *onshore* é transportada dos campos aos terminais ou diretamente até as refinarias através de oleodutos ou navios. Os petróleos transportados por duto são os petróleos Bahiano (Bacia sedimentar do Recôncavo) e Cabiúnas (Bacia

<sup>47</sup> Informação referente ao consumo de diesel em centrais elétricas autoprodutoras.

<sup>48</sup> Coeficientes de equivalência de 35,50 GJ/m<sup>3</sup> (EPE, 2016).

<sup>49</sup> De acordo com ANP (2014) *apud* in Gomes (2014) a razão média histórica da produção de água por produção de petróleo nos campos *offshore* do Brasil foi de 0,73 para o período de 2007 a 2013 (vide tabela em ANEXO). No mesmo período, a média do volume de água descartada foi de 85,6% e do volume de água não descartada (reinjeção e dessalinização) foi 14,4%. Na atividade *offshore*, considerando a média de 14% de água não descartada, o volume de água utilizada seria de 13,9 milhões m<sup>3</sup>. Para a atividade *onshore*, de acordo com GWPC (2012), ao contrário da atividade *offshore*, o valor médio para a produção de água descartada é de 90% da água produzida. Por conseguinte, o volume utilizado em 2015 seria de 6,1 milhões m<sup>3</sup> (vide ANEXO).

sedimentar de Campos). Todo o restante é transportado por navio pelo sistema de cabotagem. De acordo com ANP (2016), as quantidades dos petróleos Bahiano e Cabiúnas foram, respectivamente, de, 2,0 milhões t e 6,6 milhões t, totalizando 8,6 milhões toneladas no transporte dutoviário. Os restantes 90,1 9 milhões toneladas foram transportados através do modal hidroviário (cabotagem).

#### Fundo: Trabalho

O transporte de petróleo, derivados e combustíveis alternativos líquidos (etanol) é realizado pela Transpetro, subsidiária da Petrobrás, através do transporte dutoviário e de sua frota de navios (cabotagem e longo curso), (Transpetro, 2017). Em 2015 a Transpetro encerrou o ano com um efetivo de 7,2 mil empregados. Para estimar a parcela de trabalhadores relativa à atividade do transporte de petróleo, utilizou-se como *proxy* a média do volume de petróleo sobre o total de petróleo, derivados e etanol transportado no ano de 2015<sup>50</sup>. Estimou-se um total de 3,7 mil empregados, totalizando 6,3 milhões de horas trabalhadas.

#### Fluxo: Energia

No transporte hidroviário de petróleo, utiliza-se o combustível marítimo bunker, uma mistura de diesel e óleo combustível. Com base em EPE (2016), que apresenta o total de bunker consumido por cabotagem no país e ANTAQ (2016), que apresenta o volume total de carga movimentada por cabotagem, estimou-se a parcela de consumo de bunker relativa ao transporte de petróleo. Considerando que em 2015 o volume total de bunker foi de 1,0 milhão m<sup>3</sup> (283 mil m<sup>3</sup> diesel e 757 mil m<sup>3</sup> de óleo combustível) e o volume de petróleo correspondeu a 75,7% do total da carga transportada por cabotagem e, estimou-se um consumo hidroviário de 30,58PJ-therm.<sup>51</sup> Para o consumo de energia na atividade de transporte dutoviário,

---

<sup>50</sup> Em 2015 o volume de petróleo transportado correspondeu a 52% do total de petróleo, derivados e etanol transportado.

<sup>51</sup> Diesel 35,50 GJ/m<sup>3</sup> e óleo combustível 40,07 GJ/m<sup>3</sup> (EPE, 2016).

considerou-se um consumo de 0,14MJ/t<sup>52</sup> (Delf, 2013), estimando um consumo de 1,2 GJ-elect.

#### 4.3.2.3 Etapa 3: Refino

##### Fundo: Capacidade Produtiva

Os dados de produção de derivados de petróleo nas refinarias brasileiras são disponibilizados em ANP (2016). Em 2015 a produção de gasolina A e diesel A foi, respectivamente, de 25,7 milhões m<sup>3</sup> e 49,5 milhões m<sup>3</sup>. A **Tabela 8** mostra a produção de gasolina e diesel por refinaria, totalizando 75,2 milhões m<sup>3</sup>.

**Tabela 8: Produção de derivados de petróleo por refinaria (mil m<sup>3</sup>), 2015**

Refinarias (UF)	Oferta interna de derivados (mil m <sup>3</sup> )		
	total	gasolina	Diesel
<b>Total</b>	<b>118.449</b>	<b>25.726</b>	<b>49.458</b>
Manguinhos (RJ)	395	395	-
Riograndense (RS)	652	186	333
Lubnor (CE)	467	-	33
Recap (SP)	2.528	801	1.139
Reduc (RJ)	12.571	1.808	2.992
Refap (RS)	10.325	2.762	5.027
Regap (MG)	9.108	2.019	3.900
Reman (AM)	2.189	348	760
Repar (PR)	11.960	2.943	5.648
Replan (SP)	23.780	5.703	12.071
Revap (SP)	14.595	3.044	4.826
Rlam (BA)	15.341	3.020	5.408
RPBC (SP)	8.851	2.119	4.851
RPCC (RN)	2.370	579	250
Rnest (PE)	3.267	-	2.219
Univen (SP)	-	-	-
Dax Oil (BA)	49	-	0

**Fonte: ANP, 2016.**

<sup>52</sup> Cabe destacar que a literatura especializada internacional (Schipper *et al*, 2012) e nacional (EPE, 2012; 2016), desconsideram em suas análises e/ou balanços o consumo energético do modal dutoviário. Isto ocorre pela extrema dificuldade de acesso a informação, confiabilidade do dado e pouca relevância numérica de consumo. Neste estudo, optou-se por utilizar este indicador de consumo (consumo elétrico para compressores e bombas), mas deixando bem clara a ressalva de fragilidade do dado.

### Fundo: Terra

A área ocupada pelas refinarias é mostrada na **Tabela 9**. Em 2015 a extensão de área utilizada pelas unidades de refino somou um total de 120 km<sup>2</sup> ou 11,9 mil hectares<sup>53</sup> (Petrobras, 2017; Riograndense, 2017; Dax Oil, 2017).

**Tabela 9: Área ocupada pelas refinarias (mil hectares), 2015**

	km <sup>2</sup>	Hectares (ha)
<b>Total</b>	<b>120</b>	<b>11.985</b>
Manguinhos (RJ)	0,10	10
Riograndense (RS)	0,40	40
Lubnor (CE)	0,40	40
Recap (SP)	3,70	370
Reduc (RJ)	13,00	1.300
Refap (RS)	5,80	580
Regap (MG)	12,50	1.250
Reman (AM)	9,80	980
Repar (PR)	10,00	1.000
Replan (SP)	9,10	910
Revap (SP)	10,30	1.030
Rlam (BA)	6,50	650
RPBC (SP)	7,00	700
RPCC (RN)	25,00	2.500
Rnest (PE)	6,20	620
Univen (SP)		-
Dax Oil (BA)	0,05	5

**Fonte: Elaboração própria a partir de Petrobras, 2017; Riograndense, 2017; Dax Oil, 2017.**

### Fundo: Trabalho

A estimativa do número de horas trabalhadas na atividade de refino de petróleo se baseou na Pesquisa Industrial Anual/PIA em IBGE (2017) e ANP (2016). Considerando uma média de produção de 2,13 milhões/m<sup>3</sup> por empregado<sup>54</sup> por ano, estimou-se um total de 101 milhões de horas trabalhadas na atividade de refino em 2015.

---

<sup>53</sup> 1 km<sup>2</sup> = 100 hectares.

<sup>54</sup> De acordo com PIA/IBGE, em 2012 havia um total de 56.383 empregados nas unidades relativas à atividade de refino de petróleo, que produziram 120, 2 milhões m<sup>3</sup> (ANP, 2016).

### Fluxo: Energia

De acordo com Szklo e Shaeffer (2007), o consumo energético nas refinarias para a geração de calor e eletricidade advém, sobretudo, de resíduos de processos: gás de refinaria, coque e óleos residuais (óleo combustível, resíduos de vácuo e resíduos de asfalto) e representam aproximadamente um total de 6,6% da carga de petróleo processada. No que se refere à parcela do consumo de eletricidade, praticamente toda a energia elétrica é gerada internamente nas refinarias brasileira<sup>55</sup> e representam em média 1% deste consumo total energético.

A **Tabela 10** mostra o volume de carga processada por refinaria e o consumo próprio estimado em 2015, somando um total de 280 PJ-therm e 2,4 PJ-electr.

---

<sup>55</sup> Os valores de aquisição de eletricidade (compra em rede), na atividade de refino, são normalmente baixos. Como por exemplo, de 3% do total do consumo próprio nas refinarias PADD V (Alaska, Arizona, California, Hawaii, Nevada, Oregon and Washington) (Worrell e Galitsky, 2004).

**Tabela 10: Volume de carga processada (mil m³) e consumo energético (PJ) por refinaria, 2015**

Refinarias (UF)	Volume de carga processada mil m³				consumo proprio	
	Total geral	Petróleo		Outras cargas	PJ-therm	PJ-electr
		Nacional	Importado			
<b>Total</b>	<b>115.130</b>	<b>95.671</b>	<b>16.019</b>	<b>3.440</b>	<b>280,3</b>	<b>2,4</b>
Manguinhos (RJ)	391	0	6	386	1,0	0,0
Riograndense (RS)	570	463	107	0	1,4	0,0
Lubnor (CE)	492	486	0	6	1,2	0,0
Recap (SP)	2.353	2.216	131	6	5,7	0,1
Reduc (RJ)	11.657	6.705	4.742	210	28,4	0,2
Refap (RS)	10.199	7.568	2.515	116	24,8	0,2
Regap (MG)	8.857	8.760	2	95	21,6	0,2
Reman (AM)	2.041	2.038	0	3	5,0	0,1
Repar (PR)	11.519	9.491	1.925	103	28,0	0,2
Replan (SP)	22.897	17.766	4.580	551	55,7	0,4
Revap (SP)	14.192	12.293	1.626	273	34,6	0,3
Rlam (BA)	15.134	14.132	3	1.000	36,8	0,3
RPBC (SP)	9.136	8.788	333	15	22,2	0,2
RPCC (RN)	1.968	1.968	0	0	4,8	0,0
Rnest (PE)	3.674	2.971	51	652	8,9	0,1
Univen (SP)	0	0	0	0	0,0	0,0
Dax Oil (BA)	51	26	0	24	0,1	0,0

**Fonte: Elaboração própria a partir de ANP, 2016 e Szklo e Shaeffer, 2007.**

### Fluxo: Água

A **Tabela 11** mostra o consumo de água e o Índice de Consumo de Água (ICA) para quase todas as refinarias brasileiras no período de 2010, de acordo com (ANP, 2010; SCHOR, 2006; AQUINO *et al.*, 2010) *apud in* Pombo (2011). A média brasileira foi de 0,802 m³ de água/m³ petróleo. Mundialmente o ICA das refinarias de petróleo se situa na faixa de 0,7 a 1,2 m³ de água/m³ de petróleo processado (DIEPOLDER, 1992).

**Tabela 11: Consumo de água por refinaria**

Refinaria	Região	Estado	Bacia Hidrograf.	Petróleo processado (m³/dia) <sup>1</sup>	Consumo de água (m³/dia) <sup>2</sup>	ICA (m³ H <sub>2</sub> O/m³ petróleo) <sup>2</sup>	Efluente gerado (m³/dia) <sup>2</sup>	Início de func.
LUBNOR	Nordeste	CE	Reg. Met. Fortaleza	961	n.d.	n.d.	678	n.a.
REMAN	Norte	AM	Rio Amazonas	6.511	3.261	0,450	3.287	n.a.
RECAP	Sudeste	SP	Alto Tietê	6.630	6.385	0,870	2.194	n.a.
REFAP	Sul	RS	Rio dos Sinos	26.605	13.759	0,800	6.546	n.a.
REGAP	Sudeste	MG	Rio Paraopeba	22.857	22.425	1,060	9.483	n.a.
RPBC	Sudeste	SP	Rio das Pedras	26.386	27.276	1,140	21.381	n.a.
REPAR	Sul	PR	Rio Iguaçu	30.027	16.091	0,570	8.852	n.a.
REVAP	Sudeste	SP	Paraíba do Sul	38.896	21.239	0,560	10.276	n.a.
REDUC	Sudeste	RJ	Guandu	33.269	41.342	1,190	25.285	n.a.
RLAM	Nordeste	BA	Rio Catu	35.158	27.791	0,690	15.989	n.a.
REPLAN	Sudeste	SP	Rio Paraná	55.025	39.421	0,690	13.745	n.a.
RNEST <sup>3</sup>	Nordeste	PE	Rio Ipojuca	36.570	n.a.	n.a.	400 a 600	2012
COMPERJ	Sudeste	RJ	Baía de Guanabara	54.855	n.a.	n.a.	n.a.	2012
Premium I	Nordeste	MA	n.d.	99.736	n.a.	n.a.	n.a.	2015
Premium II	Nordeste	CE	Reg. Met. Fortaleza	49.868	n.a.	n.a.	n.a.	2014
TOTAL <sup>4</sup>	n.a.	n.a.	n.a.	523.354	218.990	0,802	118.116 a 118.316	n.a.

**Fonte: Pombo, 2011.**

Para o consumo de água na atividade de refino foram consideradas os ICAs de cada refinaria e o valor médio para o caso da ausência de dados, como no caso das refinarias Manguinhos, Riograndense, Lubnor, RPCC, Rnest, Univen e Dax Oil. Assim, estima-se que em 2015 o volume de água consumida nas refinarias foi de um total de 91 milhões m³.

#### 4.3.2.4 Etapa 4: Transporte #2

##### Fundo: Capacidade Produtiva



Em atendimento à Portaria ANP nº 035/2012 de 13/11/2012, a ANP disponibiliza as informações mensais do volume de derivados de petróleo (por produto) transportados por duto, considerando os pontos de origem e destino<sup>56</sup>. Considerando a distribuição logística mapeada por ANP (2015) até as bases primárias<sup>57</sup>, tem-se que todo o combustível (gasolina + diesel) não transportado pelo modal dutoviário é transportado pelo modal aquaviário. Como resultado, estimou-se os volumes de 17, 6 milhões m<sup>3</sup> no modal dutoviário e 66,0 milhões m<sup>3</sup> no modal aquaviários.

#### Fundo: Trabalho

Assim como na etapa de transporte #1 para estimar a parcela de trabalhadores da subsidiária Transpetro relativa à atividade de transporte dos combustíveis gasolina A e diesel A até as bases de distribuição primária, utilizou-se como *proxy* o volume de gasolina A e diesel A sobre o total de petróleo, derivados e etanol transportado no ano de 2015<sup>58</sup>. Estimou-se um total de 2,7 mil empregados, totalizando 4,5 milhões de horas trabalhadas.

#### Fluxo: Energia

Assim como realizado na etapa anterior de transporte (#2), com base nos dados de consumo de bunker para cabotagem em EPE (2016) e na participação dos combustíveis gasolina e diesel na movimentação de carga por cabotagem (0,2%) em ANTAQ (2016), estimou-se o consumo de bunker para cabotagem em 0,07 PJ-therm. Para o consumo de energia na atividade de transporte dutoviário, considerou-se um consumo de 0,14MJ/t (Delf, 2013), estimando um consumo de 2,4 GJ-elect.

---

<sup>56</sup> <http://www.anp.gov.br/wwwanp/armazenamento-e-movimentacao-de-produtos-liquidos/oleodutos-de-transporte-e-transferencia>.

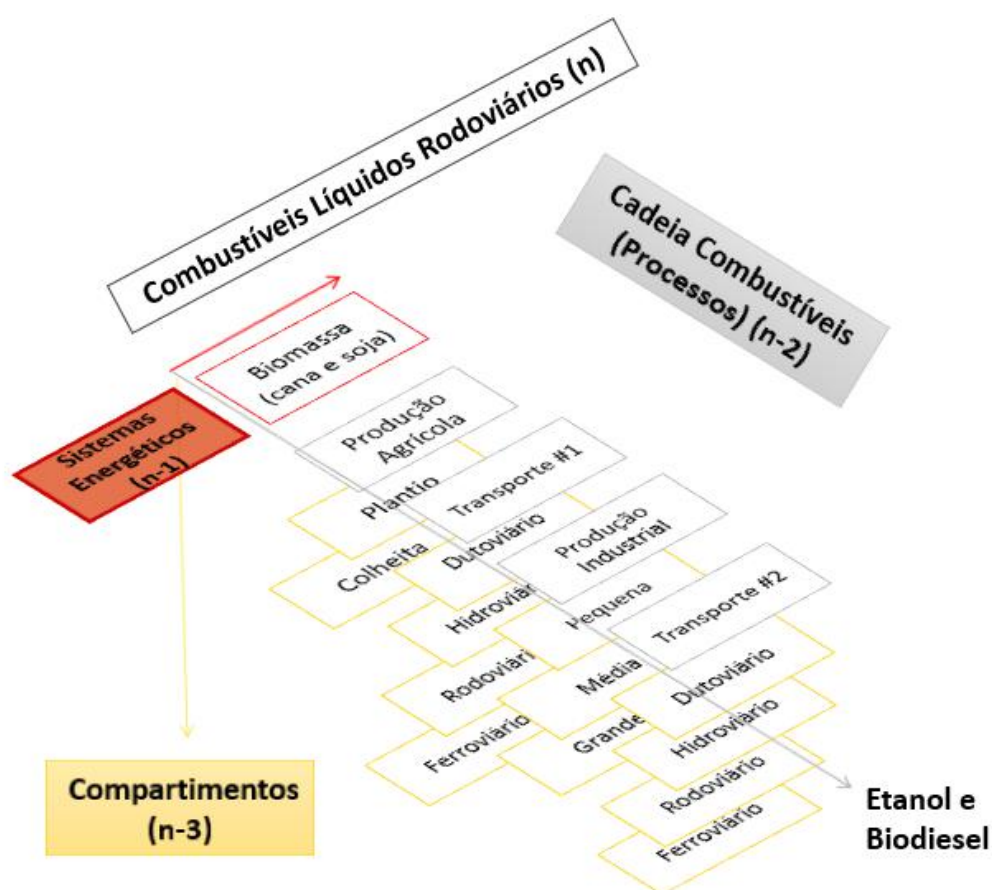
<sup>57</sup> Vide Anexo.

<sup>58</sup> Em 2015 o volume de gasolina e diesel transportado correspondeu a 39% do total de petróleo, derivados e etanol transportado.

## 4.4 Aplicação do MuSIASEM aos Biocombustíveis

### 4.4.1 Desenvolvimento da Gramática para biocombustíveis rodoviários

A **Figura 26** mostra a definição dos compartimentos para os biocombustíveis. Respectivamente, Nível  $n$ , combustíveis líquidos do transporte rodoviário (etanol e biodiesel); Nível  $n-1$ , o sistema energético em análise (biomassa de cana de açúcar e soja); Nível  $n-2$ , as 4 etapas (processos) da cadeia de combustíveis; e Nível  $n-3$ , detalhamento dos processos (varia conforme especificidades do sistema energético em análise).



**Figura 26:** Estruturação dos biocombustíveis de cana de açúcar e soja no MuSIASEM

**Fonte:** Elaboração própria.

Sob a ótica de processos (nível  $n-2$ ) as etapas são definidas da seguinte forma: Etapa 1 – produção agrícola, subdividida em atividades de plantio e colheita (nível  $n-3$ ) e

subdividida em colheita manual e colheita mecânica (nível n-4); Etapa 2 - transporte da matéria prima (cana de açúcar e soja) até unidades produtoras, subdividida por tipo de modal (nível n-3); Etapa 3 – transformação, subdividida por tamanho das unidades produtoras (pequenas, médias e grandes) (nível n-3); e Etapa 4 - transporte dos combustíveis etanol anidro, hidratado e biodiesel, analisada por tipo de modal (nível n-3). A **Tabela 12** a seguir mostra em detalhes todos os compartimentos considerados no estudo.

**Tabela 12: Definição dos compartimentos para os biocombustíveis**

NÍVEL n	<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO</b>	
	<b>ETANOL/BIODIESEL</b>	
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>	
	<b>BIOMASSA (cana de açúcar e soja)</b>	
	ETANOL	BIODIESEL
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>	
	<b>PRODUÇÃO AGRÍCOLA</b>	
	NÍVEL n-3	PLANTIO
		COLHEITA
	NÍVEL n-4	Mecânica
		Manual
	<b>TRANSPORTE #1</b>	
	NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO
		HIDROVIÁRIO
		RODOVIÁRIO
		FERROVIÁRIO
	<b>PRODUÇÃO INDUSTRIAL</b>	
	NÍVEL n-3	PEQUENA (< 2 milhões m³)
		MÉDIA ( 2 - 5 milhões m³)
		GRANDE (> 5 milhões m³)
	<b>TRANSPORTE #2</b>	
	NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO
		HIDROVIÁRIO
		RODOVIÁRIO
		FERROVIÁRIO

#### 4.4.2 Aplicação numérica: Caso etanol

A produção do combustível etanol passa pelas seguintes etapas: i) plantio e colheita da cana de açúcar; ii) transporte da cana de açúcar colhida para as destilarias e unidades

mistas; iii) produção do etanol anidro e hidratado e iv) transporte do etanol anidro e hidratado às bases primárias.

#### 4.4.2.1 Etapa 1: Fase agrícola (Plantio e Produção)

##### Fundo: Capacidade Produtiva

A produção total de cana-de-açúcar, na safra 2014/15, foi de 634,8 milhões de toneladas. Do total de cana-de-açúcar produzida nesta safra, 23,5 % teve origem na colheita manual e 76,5% na colheita mecânica (CONAB, 2017). A distinção entre estes dois tipos de colheita é fundamental para as estimativas de trabalho e energia. A **Tabela 13** mostra as quantidades produzidas, por colheita manual e mecânica, em 2015.

**Tabela 13: Produção de cana de açúcar – colheitas manual e mecânica**

	Área (ha)	Quantidade (t)	%
Colheita Manual	2.119.166	149.389.709	23,5%
Colheita Mecânica	6.885.314	485.377.420	76,5%
<b>Total</b>	<b>9.004.480</b>	<b>634.767.129</b>	<b>100%</b>

**Fonte: CONAB, 2017.**

##### Fundo: Terra

A área colhida de cana-de-açúcar (vide **Tabela 13**) foi de um total de 9,0 milhões de hectares, representando 84,9% da área destinada ao plantio, que foi de 10,6 milhões hectares na safra 2014/15 (CONAB, 2017).

##### Fundo: Trabalho

O número de horas trabalhadas no campo é dividido em duas fases: a fase do plantio e a fase da colheita. Na primeira fase, de acordo com UDOP/IEA (2016), estima-se uma

média de 1,38 horas por hectare. Considerando a área plantada de cana-de-açúcar de 10,6 milhões hectares, tem-se um total de 7,7 milhões horas de trabalho na fase do plantio.

Na segunda fase, o número de horas trabalhadas na colheita foi estimado a partir das informações disponibilizadas em CONAB (2017), mostrado na **Tabela 14**. Para a colheita manual dos 149,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar foram necessários 146 dias úteis de trabalho e um total de 139 mil trabalhadores. Considerando a média de 1,1 mil canas cortadas por trabalhador e uma jornada de 8 horas/dia, estimou-se um total de 162 milhões de horas na colheita manual. Já para a colheita mecânica dos 485 milhões de toneladas de cana-de-açúcar foram necessários 183 dias de máquina em operação e um total de 5,8 mil colhedeiras. Considerando a média de 83,3 mil canas cortadas por colhedeira e um trabalhador operando por máquina, com 8 horas diárias, estimou-se um total de 8,5 milhões de horas na colheita mecânica. Por conseguinte, tem-se um total de 171,0 milhões horas de trabalho na fase da colheita. No total da atividade agrícola (plantio e colheita), 178,7 milhões de horas trabalhadas.

**Tabela 14: Horas trabalhadas – colheitas manual e mecânica**

<b>Colheita manual</b>	
Área (ha)	2.119.166
Quantidade (toneladas)	149.389.709
Dias uteis trabalho	146
Qt cana dia cortada (toneladas)	7,4
Média cana cortada/trabalhador (t)	1.070
Nº cortadores	139.607
Horas Trabalho (mil)	<b>162.503</b>
<b>Colheita mecânica</b>	
Área (ha)	6.885.314
Quantidade (toneladas)	485.377.420
Qt media cana cortada/dia (t)	455
Dias maquina operação	183
Média cana colhida/maq	83.341
Nº colhedeiras	5.824
Horas Trabalho (mil)	<b>8.526</b>
<b>Total</b>	
Área (ha)	9.004.480
Quantidade (toneladas)	634.767.129
Horas Trabalho (mil)	<b>171.029</b>

**Fonte: Elaboração própria a partir de CONAB, 2017.**

## Fluxo: Energia

No ciclo produtivo da cana de açúcar ocorre o consumo de óleo diesel nas fases agrícolas de plantio e colheita mecânica. A **Tabela 15** mostra o consumo de diesel (litro/ha) por tipo de atividade, de acordo com Soares *et al* (2009). Considerando-se a área total de 10,6 milhões de hectares para plantio e a área de colheita mecanizada de 6,9 milhões de hectares (vide **Tabela 13**), estimou-se um consumo energético total de 81,76 PJ therm<sup>59</sup> na fase agrícola.

**Tabela 15: Consumo de óleo diesel na atividade agrícola de cana de açúcar**

	<b>l/ha</b>	<b>MJ/ha</b>	<b>PJ</b>
<b>Fase agrícola</b>	<b>215,62</b>	<b>10.291,54</b>	<b>81,76</b>
<b>Plantio da Cana</b>	<b>107,72</b>	<b>5.141,48</b>	<b>46,30</b>
Aplicação de calcário	3,37	160,85	1,45
Incorporação dos restos culturais	6,92	330,29	2,97
Aração pesada I	13,94	665,36	5,99
Subsolagem	22,41	1.069,63	9,63
Aração pesada II	13,53	645,79	5,81
Aração pesada III	13,53	645,79	5,81
Gradagem	5,16	246,29	2,22
Sulcamento	9,13	435,77	3,92
Distribuição de mudas	4,18	199,51	1,80
Fechamento dos sulcos e aplicação inseticidas	1,90	90,69	0,82
Aplicação de herbicidas	1,21	57,75	0,52
Capina entre linha	3,82	182,33	1,64
Remoção de resíduos	2,92	139,37	1,25
Capina entre linha	4,49	214,31	1,93
Aplicação de herbicidas	1,21	57,75	0,52
<b>Colheita</b>	<b>107,90</b>	<b>5.150,07</b>	<b>35,46</b>
Mecânica	107,90	5.150,07	35,46
Manual	-	-	-

**Fonte: Elaboração própria a partir de Soares *et al*, 2009 e CONAB, 2017.**

## Fluxo: Água

De acordo com Macedo (2002; 2008), a precipitação total exigida pela cana-de-açúcar é estimada como sendo 1500-2500 mm / ano, sendo a produção de cana-de-açúcar alimentada

<sup>59</sup> Valor calorífico de 1 litro diesel = 47,73 MJ (EPE, 2016).

basicamente pela chuva por todo o Brasil. Na fase de cultivo da cana, a água é em geral suprida pelo uso dos resíduos líquidos, como a vinhaça e a torta de filtro, que são reciclados para o campo como fertilizantes orgânicos. A vinhaça é o principal efluente líquido, produzido em proporção de 10-15 l/l de etanol, que é completamente utilizado na fertirrigação de cana. Assim, a entrada de água azul é relativamente pequena e seu uso atividade agrícola pode ser desconsiderado (Rossetto, 2004; Hernandes *et al*, 2013, Macedo, 2008). A demanda de água azul no setor sulcroatcooleiro é concentrada e intensiva na fase industrial, como será mostrado na etapa 3 (transformação).

#### 4.4.2.2 Etapa 2: Transporte #1

##### Fundo: Capacidade Produtiva

Do total produzido de cana de açúcar (634,8 milhões de toneladas), nesta etapa se considera apenas a quantidade de cana de açúcar transportado para as destilarias e usinas mistas (ambas produtoras de etanol), no total de 627 milhões de toneladas. De acordo com Barros e Wanke (2012), o transporte é todo realizado pelo modal rodoviário<sup>60</sup>.

##### Fundo: Trabalho

O transporte de carga de granel sólido é feito por composições pesadas como o Romeu e Julieta (28t), o Treminhão (45t) e Rodotrem (58t) (DECOPE, 2014). Considerando o transporte pela composição média (treminhão/45 t) (Lazzarini et al, 2010), um empregado por viagem realizada (Scherer, 1999) e a quantidade transportada de 627 milhões t, estimou-se um total de 46 mil empregados ou 111,5 milhões de horas trabalhadas.

---

<sup>60</sup> O transporte de cana de açúcar requer uma infraestrutura de caminhões e carretas (reboques e semi-reboques) suficientes para garantir o abastecimento contínuo da usina.

### Fluxo: Energia

Nesta etapa ocorre o consumo de óleo diesel nos caminhões (modal rodoviário) para o transporte da cana de açúcar do campo para a usina. De acordo com Macedo (2004), considerando uma distância média percorrida entre a área de colheita e as usinas de 20 km, estima-se um consumo de 0,816 L/t cana. Dado a quantidade de 627 milhões de toneladas transportadas, em 2015 o consumo de diesel final foi de 18,17 PJ therm.

#### 4.4.2.3 Etapa 3: Transformação (Destilarias e Usinas Mistas)

### Fundo: Capacidade Produtiva

De acordo com CONAB (2017), em 2015 havia um total de 10 usinas de açúcar, 89 destilarias e 253 unidades mistas de produção (etanol e açúcar), totalizando 352 unidades produtoras. A quantidade total de cana-de-açúcar moída nas unidades produtiva foi de 634,8 milhões toneladas. Considerando-se a moagem das destilarias e das usinas mistas, isto é, excluindo a moagem das usinas de açúcar (produção exclusiva de açúcar), tem-se um total de 342 unidades produtoras de etanol com um total de 627 milhões toneladas de cana-de-açúcar moída. A **Tabela 16** mostra a quantidade de cana moída de acordo com o porte da usina, seguindo a classificação dos compartimentos definidos na estrutura do MuSIASEM. Com base em CONAB (2017), estimou-se que 46% da produção foi realizada por unidades com capacidade de até 2 milhões de toneladas, 48% por unidades entre 2 e 5 milhões de toneladas e 6% por unidades com capacidade superior a 5 milhões de toneladas.

**Tabela 16: Produção de etanol por porte da unidade produtora em 2015 (mil t)**

	Quantidade (mil t)	%
Micro( < 2 milhões t)	286.723	46%
Média (2-5 milhões t)	300.674	48%
Grande (> 5 milhões t)	39.752	6%
<b>Total</b>	<b>627.148</b>	<b>100%</b>

**Fonte: Elaboração própria a partir de CONAB, 2017.**



### Fundo: Terra

Para estimar a área ocupada pelas destilarias e usinas mistas, com base em TEEIC (2017), adotou-se como premissa a extensão média 6 hectares para uma unidade pequena, 21 hectares para uma unidade média e 36 hectares para uma unidade de grande porte. Considerando os dados apresentados no item anterior, de número de usinas e tamanhos, estimou-se uma ocupação total de 4,7 mil hectares.

### Fundo: Trabalho

A estimativa do número de horas trabalhadas nas atividades industriais de produção do etanol se baseou em IBGE (2017) e CONAB (2017). Considerando uma média de 603 trabalhadores por unidade produtiva<sup>61</sup> e um total de 342 unidades produtoras em 2015, estimou-se um total de 369 mil horas trabalhadas.

### Fluxo: Energia

Toda a eletricidade (e vapor) obtida na cogeração é suprida pelas próprias unidades industriais produtoras de etanol através do aproveitamento da biomassa renovável (bagaço) disponível. Assim, não há compra de eletricidade de terceiros (ÚNICA, 2017). Desde 2013, o setor sucroenergético de cana de açúcar vem gerando mais energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN) do que para o consumo próprio das unidades fabris, ficando numa relação 60% de energia para a rede e 40% para consumo próprio em 2015.<sup>62</sup> Em 2015, considerando os indicadores de kWh/tonelada de cana de açúcar de autoconsumo e despacho para a rede, respectivamente, de 21,67 kWh/t e 32,27 kWh/t (ÚNICA, 2017) e uma equivalência energética de 9MJ/kWh (Seabra *et al*, 2011), estimou-se um consumo próprio energético de 122 PJ-electr e de despacho para o SIN de 182 PJ-electr (este não incorporado no fluxo).

---

<sup>61</sup> De acordo com PNAD (2012), em 2012 havia 145.474 empregados para 241 unidades produtoras de etanol, resultando em uma média de 603 empregados/unidade.

<sup>62</sup> Em 2015, considerando a produção de 270kg de bagaço/tonelada de cana (ÚNICA, 2017), estimou-se uma produção total de bagaço de 169,3 milhões de toneladas (bagaço com 50% de umidade).

### Fluxo: Água

De acordo com Hernandes *et al* (2013), o volume de água consumido na etapa de processamento da cana de açúcar no Brasil é em média de 1,85 m<sup>3</sup>/tonelada<sup>63</sup>. Considerando o volume de 627,1 milhões de cana de açúcar processadas nas destilarias e usinas mista, estimou-se um total de 1,2 bilhão m<sup>3</sup>/ano de água.

#### 4.4.2.4 Etapa 4: Transporte #2

### Fundo: Capacidade Produtiva

Em atendimento à Portaria ANP nº 035/2012 de 13/11/2012, a ANP disponibiliza as informações mensais do volume de etanol transportado por dutos, considerando os pontos de origem e destino<sup>64</sup>. Considerando que todo o combustível não transportado pelo modal dutoviário é transportado pelo modal rodoviário (Barros e Wanke, 2012), estimou-se os volumes de 1,1 milhão m<sup>3</sup> no modal dutoviário e 28,6 milhões m<sup>3</sup> no modal rodoviário.

### Fundo trabalho

O transporte dos combustíveis pelo modal rodoviário é realizado através de caminhões-tanques (ANP, 2015). Com base em Scherer (1999), que considera uma média de 25 viagens mês por empregado na condução de um caminhão-tanque, com capacidade de 16 mil litros (truck ou pesado), estimou-se um volume anual transportado por empregado de 4,8 milhões litros. Considerando o volume de etanol transportado pelo modal rodoviário (28,6 milhões m<sup>3</sup>), estimou-se um total de 6,2 mil empregados ou 14,9 milhões de horas trabalhadas.

Para estimar a parcela de trabalhadores relativa à atividade de transporte dutoviário de etanol até as bases primárias, assim como no transporte de gasolina e diesel, utilizou-se como *proxy* o volume de etanol sobre o total de petróleo, derivados e etanol transportado no

---

<sup>63</sup> Valor médio corroborado em FIESP (2009), considerando um índice de reuso de 91%.

<sup>64</sup> <http://www.anp.gov.br/wwwanp/armazenamento-e-movimentacao-de-produtos-liquidos/oleodutos-de-transporte-e-transferencia>.

ano<sup>65</sup> de 2015 e o total de empregados em Transpetro (2017). Estimou-se um total de 66 mil horas trabalhadas.

### Fluxo: Energia

Com base em EPE (2016 e 2012) e EPL (2017), estimou-se o consumo de diesel rodoviário no transporte de etanol. Considerando a participação do transporte de carga sobre o consumo total de diesel final rodoviário de 69,7% em EPE (2012)<sup>66</sup>, a participação do transporte de combustíveis líquidos<sup>67</sup> no total da carga movimentada no modal rodoviário de 5% em 2015 (EPL, 2017) e a participação do etanol de 28,4% sobre o total de combustíveis líquidos em 2015 (EPE, 2016), tem-se um consumo de diesel final rodoviário para entrega do etanol de 412 mil m<sup>3</sup> ou 14,6 PJ-therm. Para o consumo de energia na atividade de transporte dutoviário, considerou-se um consumo de 0,14MJ/t (Delf, 2013).

#### *4.4.3 Aplicação numérica: Biodiesel*

A produção do combustível biodiesel passa pelas seguintes etapas: i) produção da soja; ii) transporte da soja colhida para as unidades produtoras; iii) produção do biodiesel e iv) a entrega do biodiesel para mistura com o diesel A.

---

<sup>65</sup> Em 2015 o volume de etanol transportado correspondeu a aproximadamente 0,5% do total de petróleo, derivados e etanol transportado (ANP, 2016).

<sup>66</sup> Em EPE (2012), o diesel rodoviário de carga é a diferença entre a demanda de diesel do setor transporte (divulgada no Balanço Energético) e o somatório da demanda de diesel nos veículos comerciais leves e nos ônibus (respectivamente obtidos nos modelos Modelo Leve Diesel/MLD e Modelo Pesado de Passageiro/MPP).

<sup>67</sup> Combustíveis líquidos é alocado em Granel Líquido em EPL (2017), que apresenta a seguinte divisão de grupos de mercadorias, por modal: Granel Sólido Agrícola/GSA: farelo de soja, milho em grão e soja em grão. Granel Sólido Não Agrícola/GSNA: carvão mineral, cimento, minério de ferro e outros minerais. Carga Geral/CG: alimentos e bebidas (processados), celulose e papel, outros da lavoura e pecuária, produtos básicos de borracha, plástico e não metálicos, produtos da exploração florestal e da silvicultura e manufaturados. Granel Líquido/GL: combustíveis, petro e químicos.

#### 4.4.3.1 Etapa 1: Fase agrícola (Plantio e Produção)

##### Fundo: Capacidade Produtiva

A produção total de soja na safra 2014/15 foi de 96,9 milhões de toneladas (ABIOVE, 2017). Toda a produção de soja foi realizada a partir do sistema de plantio direto mecanizado (CONAB, 2017).

##### Fundo: Terra

A área colhida de soja foi de um total de 31,9 milhões de hectares, representando 99,5% da área destinada ao plantio, que foi de 32,1 milhões hectares na safra 2014/15 (ABIOVE, 2017).

##### Fundo: Trabalho

A estimativa do número de horas trabalhadas na atividade agrícola de produção de soja se baseou em MTE (2013) *apud in* Anholetto e Massuquetti (2014), cuja pesquisa mostra o histórico de emprego no cultivo de soja no Brasil de 1994 a 2010<sup>68</sup>. Como premissa, foi considerada a média histórica de trabalhador/t dos últimos 10 anos da pesquisa, resultando em uma média de 0,95 trabalhador/tonelada produzida. Assim, considerando a produção de 96,9 milhões de toneladas em 2015, estimou-se um total de 164,1 mil horas trabalhadas.

##### Fluxo: Energia

No ciclo produtivo da soja ocorre o consumo de óleo diesel nas fases agrícolas de plantio e colheita mecânica. A **Tabela 17** mostra o consumo de diesel (litro/ha) por tipo de atividade (Mello *et al*, 2005). Considerando a área total de 32,1 milhões de hectares para

---

<sup>68</sup> Vide tabela em Anexos.

plantio e a área de colheita mecanizada de 31,9 milhões de hectares, estimou-se um consumo energético total de 80,51 PJ<sup>69</sup> therm na fase agrícola.

**Tabela 17: Consumo de óleo diesel na fase agrícola (plantio + colheita) de soja**

	L/ha	PJ
<b>Fase agrícola</b>	<b>50,26</b>	80,51
<b>Plantio</b>	<b>21,26</b>	33,81
Dessecagem da cobertura verde	0,58	0,94
Calagem	2,36	3,69
Semeadura da soja (plantio direto)	8,67	13,88
Aplicação de inseticida	0,58	0,94
Aplicação de fungicida	0,58	0,94
Aplicação de defensivo contra ferrugem	0,58	0,94
Semeadura da cobertura verde	7,91	12,50
<b>Colheita</b>	<b>29,00</b>	46,70

**Fonte: Elaboração própria a partir de Mello *et al*, 2005.**

#### Fluxo: água

Assim como no caso da cana de açúcar, o consumo de água azul para a produção da cultura de soja pode ser desconsiderado, dado a pouca relevância nesta etapa produtiva (Bleninger e Kotsuka, 2015).<sup>70</sup>

#### 4.4.3.2 Etapa 2: Transporte #1

#### Fundo: Capacidade Produtiva

Do total produzido de soja (96,9 milhões de toneladas), nesta etapa se considera apenas a quantidade de soja transportada para o processamento interno. Considerando as quantidades de importação e exportação, respectivamente de 324 mil e 54,3 milhões de toneladas, a quantidade transportada de grãos de soja foi de 40,5 milhões t. De acordo com

<sup>69</sup> Valor calorífico de 1 litro diesel = 47,73 MJ (EPE, 2016).

<sup>70</sup> Cabe destacar que existe um uso considerável de água verde, estimado em Hoekstra e Chapagain (2007) da ordem de 1.793 m<sup>3</sup>/t .

(ABIOVE, 2017 e MTPA, 2017), o volume é todo transportado pelo modal rodoviário e percorre em geral distâncias médias de 200 km (MTPA, 2017).<sup>71</sup>

#### Fundo: Trabalho

O transporte de carga de granel sólido é feito por composições pesadas como o Romeu e Julieta (28t), o Treminhão (45t) e Rodotrem (58t) (DECOPE, 2014). Considerando o transporte pela composição média (treminhão/45 t) (Lazzarini et al, 2010), dois empregados por carreta - viagem realizada (Scherer, 1999)<sup>72</sup> e a quantidade transportada de 40,5 milhões t, estimou-se um total de 3 mil empregados ou 14,4 milhões de horas trabalhadas.

#### Fluxo: Energia

Nesta etapa ocorre o consumo de óleo diesel nos caminhões (modal rodoviário) para o transporte da soja as unidades produtoras. Considerando um consumo de 43 kg diesel por tonelada de soja transportada (EPE, 2005) e a quantidade transportada de 40,5 milhões t, estimou-se um consumo de 73,70 PJ therm.

#### 4.4.3.3 Etapa 3: Transformação

#### Fundo: Capacidade Produtiva

De acordo com ANP (2016), em 2015 havia um total de 53 unidades produtoras de biodiesel autorizadas à operarem no Brasil, totalizando uma produção de 3,9 milhões de m<sup>3</sup> de biodiesel. A **Tabela 18** mostra a distribuição da produção de biodiesel, conforme tamanho das unidades produtoras em 2015 (vide **Anexos** com a lista completa das unidades produtoras). Com base em ANP (2016) e EPE (2017)<sup>73</sup>, estimou-se que 2,1% da produção

---

<sup>71</sup> As quantidades de soja transportadas, por cabotagem e ferroviário, são destinados para exportação e as quantidades destinadas majoritariamente ao mercado interno (unidades de biodiesel), são transportados pelo modal rodoviário.

<sup>72</sup> Devido as grandes distancias no transporte rodoviário de soja.

<sup>73</sup> Dados obtidos através das tabelas fontes dos mapas (Webmap EPE: <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>).

foi realizada por unidades com capacidade de até 100 mil m<sup>3</sup>, 34,9% por unidades entre 100 e 200 mil m<sup>3</sup> e 63% por unidades com capacidade superior a 200 mil m<sup>3</sup>.

**Tabela 18: Produção de biodiesel por porte de unidade produtora**

<b>Produção Industrial</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
Pequena (< 100 mil m <sup>3</sup> )	83.843	2,1%
Média (100-200 mil m <sup>3</sup> )	1.372.196	34,9%
Grande (> 200 mil m <sup>3</sup> )	2.481.242	63,0%
	3.937.281	100,0%

**Fonte: Elaboração própria a partir de ANP, 2016 e EPE, 2017**

#### Fundo: Terra

Para estimar a área ocupada pelas unidades produtoras de biodiesel, com base em TEEIC (2017), adotou-se como premissa a extensão média 6 hectares para uma unidade pequena, 21 hectares para uma unidade média e 36 hectares para uma unidade grande de porte. Considerando os dados apresentados no item anterior, de número de usinas e tamanhos, estimou-se uma ocupação total de 1,04 mil hectares.

#### Fundo: Trabalho

A estimativa do número de horas trabalhadas nas atividades industriais de produção de biodiesel se baseou em IBGE (2017) e ANP (2016). Considerando uma média de 30 trabalhadores por unidade produtiva<sup>74</sup> por ano, estimou-se um total de 2,9 mil horas trabalhadas nas plantas de biodiesel.

<sup>74</sup> De acordo com PNAD (2012), em 2012 havia 1.069 empregados para 35 unidades produtoras de biodiesel, resultando em uma média de 30 empregados/unidade.

## Fluxo: Energia

A etapa industrial de produção do biodiesel se refere ao processamento de um dos subprodutos do processamento da soja<sup>75</sup>, o óleo bruto de soja. Somente então o óleo bruto de soja passa pelo processo de transesterificação<sup>76</sup> (etílica ou metílica) para produção final do biodiesel (EMBRAPA, 2015, Garcilasso, 2014). Por conseguinte, para estimar o consumo energético de produção do biodiesel, devem ser considerados os consumos tanto no processamento da soja quanto na extração do óleo bruto de soja.

De acordo com EPE (2005), na etapa de processamento da soja se estima um consumo médio, por tonelada de soja processada, de 57,6 kWh de energia elétrica (70% desta energia gerada internamente e 30% adquirida de rede pública) e 160 kg de cavacos de madeira (geração de vapor e secadores de soja). Considerando uma quantidade processada de 40,5 milhões de toneladas de soja, estimou-se um consumo elétrico de 21,02 PJ<sup>77</sup> e térmico de 65 PJ<sup>78</sup>. Na etapa seguinte, de extração do óleo bruto de soja, consome-se em média 39,13 kWh eletricidade, 361,69 kg de cavacos de madeira e 130,32 kg diesel<sup>79</sup> por tonelada de óleo de soja extraída. Considerando uma quantidade de óleo extraído de 8,1 milhões de toneladas, estima-se um consumo elétrico de 2,8 PJ e térmico de 29,04PJ. Por conseguinte, estimou-se para a etapa de transformação, um consumo elétrico de 23,87 PJ e térmico de 154,6 PJ.

## Fluxo: água

De acordo com Bleninger e Kotsuka (2015), a produção do óleo de soja consome uma média de 2,16 m<sup>3</sup> por tonelada processada. Assim, considerando a quantidade processada nas

---

<sup>75</sup> A primeira etapa do processamento da soja é o recebimento dos grãos (de soja), que passam por processos de pré-limpeza, secagem e armazenamento. Em seguida, os grãos de soja passam pelo processamento, no qual são quebrados, descascados, peneirados, aspirados, laminados e expandidos (preparação dos grãos). Na sequência, ocorre o processo de extração, através do uso de solvente orgânico, que resulta no farelo de soja (torta) e no óleo bruto de soja (extração do óleo bruto). Informação completa e técnica do processo de industrialização da soja ver documento EMBRAPA (2015).

<sup>76</sup> A transesterificação alcalina é o processo químico geralmente mais utilizado no Brasil para produção do biodiesel, mas outros processos também podem ser empregados como craqueamento, esterificação, entre outros (ANP, 2017).

<sup>77</sup> Considerando 9MJ/kWh (Macedo, 2008).

<sup>78</sup> Cavacos de madeira 10,05 MJ/kg (EPE, 2005).

<sup>79</sup> Diesel 56,89 MJ/kg (Macedo, 2008)



unidades produtoras de biodiesel, no total de 40,5 milhões de toneladas de soja, estima-se uma demanda de água de 87,6 milhões de m<sup>3</sup> água.

#### 4.4.3.4 Etapa 4: transporte #2

##### Fundo: Capacidade Produtiva

O volume de biodiesel transportado para o atender a demanda do consumo rodoviário foi de um total de 3,2 milhões m<sup>3</sup> em 2015. O transporte é realizado exclusivamente pelo modal rodoviário (MTPA, 2017 e ANP, 2017).

##### Fundo trabalho

O transporte dos combustíveis pelo modal rodoviário é realizado através de caminhões-tanques (ANP, 2015). Com base em Scherer (1999), que considera uma média de 25 viagens mês por empregado na condução de um caminhão-tanque, com capacidade de 16 mil litros (truck ou pesado), estimou-se um volume anual transportado por empregado de 4,8 milhões litros. Considerando o volume transportado de biodiesel (3,2 milhões m<sup>3</sup>), estimou-se um total de 654 empregados ou 1,5 milhão de horas trabalhadas.

##### Fluxo: Energia

Com base em EPE (2016 e 2012) e EPL (2017), estimou-se o consumo de diesel rodoviário no transporte de biodiesel. Considerando a participação do transporte de carga sobre o consumo total de diesel final rodoviário de 69,7% em EPE (2012), a participação do transporte de combustíveis líquidos no total da carga movimentada no modal rodoviário de 5% em 2015 (EPL, 2017) e a participação do biodiesel de 3,0% sobre o total de combustíveis líquidos em 2015 (EPE, 2016), tem-se um consumo de diesel rodoviário de 44 mil m<sup>3</sup> ou 1,54 TJ-therm. Para o consumo de energia na atividade de transporte dutoviário, considerou-se um consumo de 0,14MJ/t (Delf, 2013).

## 4.5 Considerações

Neste capítulo foi apresentada a formalização da gramática do MuSIASEM para a cadeia de combustíveis líquidos rodoviários. Isto é, definiu-se a estrutura dos compartimentos (níveis) para os setores energéticos de petróleo e biomassa (cana de açúcar e soja) de modo a representar a cadeia para os combustíveis gasolina, diesel, etanol e biodiesel. Posteriormente foram apresentados os dados setoriais para cada setor energético, englobando os elementos de fundo capacidade produtiva (total do sistema), terra (*Land Use/LU*) e trabalho (*Human Activity/HA*) e fluxos energia (PJ-therm e PJ-elect) e água (*Water/W*).

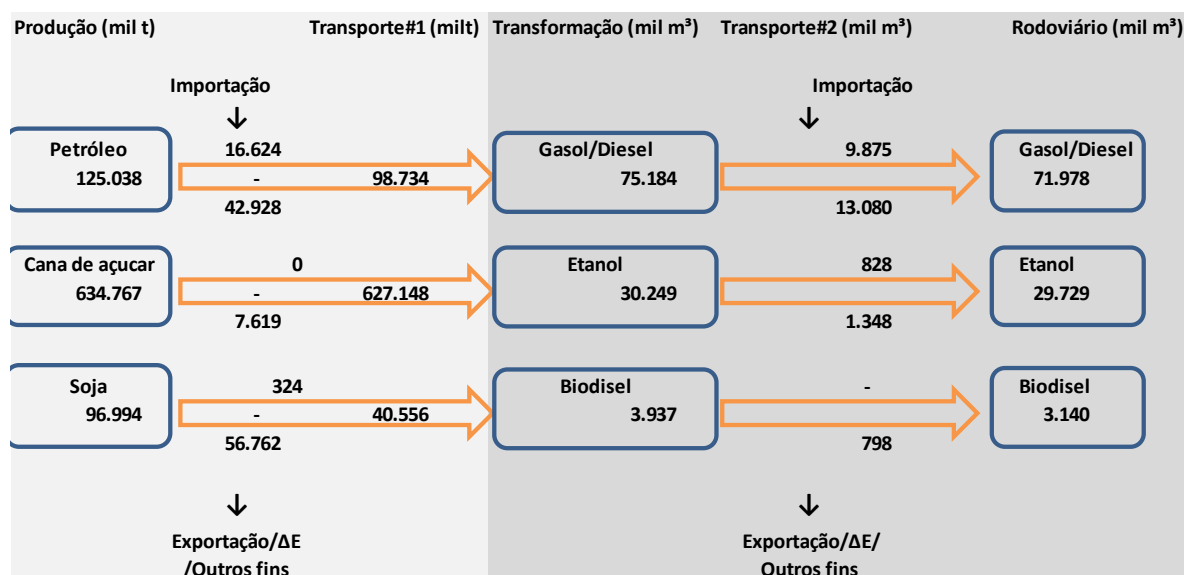
No próximo capítulo, inicialmente será feita a consolidação dos dados apresentados neste capítulo. Será apresentada a capacidade produtiva (produção potencial) dos sistemas energéticos petróleo e biomassa de cana de açúcar e soja. Posteriormente, será aplicado o *load factor* (fator de ocupação ou o peso dos combustíveis líquidos rodoviários) para a obtenção da Produção Efetiva e os respectivos fundos e fluxos associados. Isto é, a partir da produção efetiva, se recalcula os usos de terra, trabalho, água e energia nas proporções dos pesos dos combustíveis gasolina/diesel, etanol e biodiesel, dentro dos sistemas energéticos.

## **5 Resultados da Aplicação do MuSIASEM para a cadeia de combustíveis líquidos do setor rodoviário**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a aplicação do MuSIASEM à cadeia de combustíveis. Na primeira parte será mostrado o resultado da visão sistêmica da cadeia, com a gramática do setor energético para os valores físicos de energia primária (PES) e energia secundária (EC). Na segunda parte serão consolidados os dados por compartimentos para o setor petróleo (gasolina/diesel) e os biocombustíveis (etanol e biodiesel). Na sequência será feita uma consolidação das matrizes de fundos e fluxos (denominado conceitualmente no MuSIASEM de dendogramas), bem como uma análise dos resultados sob a ótica do sistema (combustíveis líquidos rodoviários ou Nível n).

### **5.1 Gramática do Sistema Energético (visão interna e externa)**

Considerando a capacidade produtiva (Produção Potencial) mostrada no capítulo anterior, apresentam-se os valores físicos de toneladas de recursos primários (PES) e m<sup>3</sup> de combustíveis (EC) sob a ótica de visão interna e visão externa do MuSIASEM. A **Figura 27** apresenta a ilustração da visão do setor energético, sendo a matriz completa dos valores físicos ou a capacidade produtiva, (incluindo todos os compartimentos) apresentada em Anexos.



**Figura 27: Visão interna e externa dos setores energéticos no MuSIASEM em 2015**

**Nota: ΔE = variação de estoque**

Na visão externa (lado esquerdo da **Figura 27**), descrevem-se as quantidades físicas em termos de fontes de energia primária (PES), o que permite analisar a situação de restrição externa dos recursos naturais. No caso do Brasil, para as fontes primárias petróleo, cana de açúcar e soja, observa-se uma autossuficiência energética. Em 2015 os volumes produzidos foram superiores aos volumes destinados ao mercado interno. Cabe destacar que devido à produção de óleos básicos lubrificantes na Refinaria Duque de Caxias (Reduc), em Duque de Caxias (RJ), importa-se o petróleo Árabe Leve (EPE, 2017). Assim, existe uma autossuficiência em termos volumétricos e não em termos de qualidade, com a importação de petróleo para atender as especificações locais de qualidade dos produtos.

No caso da biomassa, ocorreu uma oferta doméstica exclusivamente de produção nacional. A oferta doméstica (PES destinado ao mercado interno) de cana de açúcar e soja foi de, respectivamente, 627,1 milhões e 40,5 milhões de toneladas. No caso do petróleo, a oferta doméstica foi de 98,7 milhões de toneladas. Por conseguinte, a disponibilidade de recursos naturais (determinada pelos processos além do controle humano) não foi um limitante do funcionamento do sistema estudado.

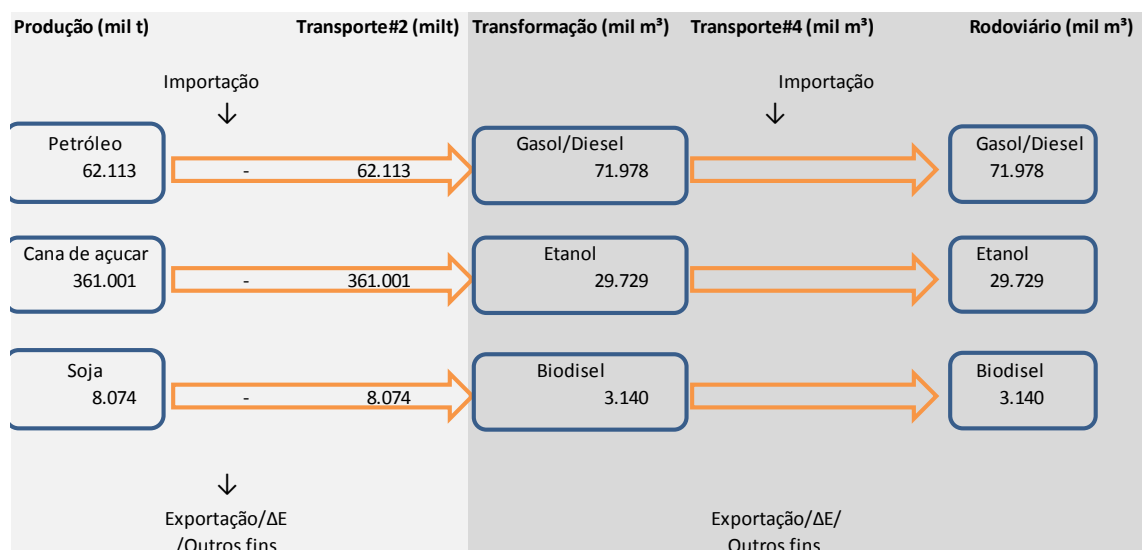
Na visão interna (no lado direito da **Figura 27**), avaliam-se as quantidades físicas em termos de energia secundária (EC), o que permite verificar a capacidade do sistema de ser

atendido por processos internos (sob controle humano). A demanda nacional de combustíveis líquidos rodoviários de gasolina/diesel, etanol e biodiesel com, respectivamente, 71,9 milhões, 29,7 milhões e 3,1 milhões de m<sup>3</sup>, foi atendida praticamente pelos fatores de produção do sistema. Houve uma importação pequena de etanol e gasolina e importações de diesel com destinos que não exclusivamente o setor rodoviário<sup>80</sup>. Sob a ótica da visão interna o país é exportador líquido das energias secundárias (combustíveis líquidos rodoviários). Dessa forma, com base nas visões internas e externas observa-se que o Brasil não apresenta um problema de disponibilidade de recursos minerais (PES), nem tampouco limitações graves nos fatores de produção para a oferta da energia secundária.

Considerando a premissa (seção 4.2.1) de utilização de um *load factor* para determinar a parcela da capacidade produtiva relativa aos combustíveis rodoviários (Produção efetiva), reestimam-se os valores da figura anterior. Sob a ótica de ilustração das quantidades físicas de toneladas de recursos primários (PES) produzidos e transportados para a produção exclusiva dos combustíveis (EC) rodoviários, tem-se a seguinte **Figura 28**. A matriz completa dos valores físicos ou produção efetiva (incluindo todos os compartimentos) é apresentada em Anexos.

---

<sup>80</sup> Existe também uma parcela de diesel importada para o transporte de carga de modo a atender às exigências de qualidade do produto. Desde de 2012, os novos veículos pesados com ciclo diesel produzidos no Brasil ou importados devem ser equipados com motores que requerem o uso de diesel com teor de enxofre de 10 ppm (Fase P-7 do Proconve).



**Figura 28: Ilustração dos resultados físicos no MuSIASEM**

A Figura anterior mostra a produção efetiva, ou as quantidades de recursos primários e secundários destinados exclusivamente aos combustíveis gasolina/diesel, etanol e biodiesel do modal rodoviário. Assim, desconsideram-se as quantidades destinadas à exportação, bem como ao uso em outros fins (produção de outros derivados, açúcar e farelo de soja).

Com base nos dados da produção efetiva, a seção seguinte apresenta uma consolidação dos dados sob a lógica de gramática do MuSIASEM para o setor petróleo e de biomassa. Posteriormente, uma consolidação dos dendogramas de fundos terra e trabalho e fluxos energia e água, (recalculados com base na produção efetiva) bem como uma análise dos resultados.

## 5.2 Consolidação numérica no MuSIASEM

Esta seção tem como objetivo apresentar os os fundos terra e trabalho e os fluxos energia e água, utilizados exclusivamente para atender a demanda dos combustíveis rodoviários.

### 5.2.1 Setor Petróleo

A **Tabela 19** mostra o consolidado numérico de fluxos e fundos para o sistema energético petróleo com os compartimentos até o Nível n-3. Ver o resultado completo em Anexo.

**Tabela 19: Consolidado Setor Petróleo**

NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>						
		<b>PETRÓLEO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		GASOLINA E DIESEL	276	1	54.864	1.361	131.712
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>						
	<b>PRODUÇÃO</b>		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			88	0	-	1.354	62.463
NÍVEL n-3		ONSHORE	9	0	-	345	17.429
Nível n-4		OFFSHORE	79	0	-	1.009	45.035
	<b>TRANSPORTE #1</b>		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			19	0	-	-	3.948
NÍVEL n-3		DUTOVIÁRIO	-	0	-	-	346
		HIDROVIÁRIO	19	-	-	-	3.602
		RODOVIÁRIO	-	-	-	-	-
		FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			168	1	54.864	7	60.726
NÍVEL n-3		PEQUENA < 5mil m³	34	0	13.564	4	9.565
		MEDIA 5-10 mil m³	101	1	31.805	3	36.805
		GRANDE > 10 mil m³	34	0	9.495	1	14.356
	<b>TRANSPORTE #2</b>		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			0	0	-	-	4.575
NÍVEL n-3		DUTOVIÁRIO	-	0	-	-	1.122
		HIDROVIÁRIO	0	-	-	-	3.452
		RODOVIÁRIO	-	-	-	-	-
		FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Nota:** PJ-therm = PJ energia térmica, PJ-eletric = PJ energia elétrica, W= Water (mil m³), LU = Land Use (mil hectares), HA = Human Activity (mil horas)

Assim, em 2015, para atender a demanda rodoviária de gasolina A e diesel A, foram necessários, no consolidado da cadeia destes combustíveis, um total do fluxo energia de 276 PJ-therm e 1 PJ-electr, do fluxo água (W) de 54 milhões m³, do fundo terra (LU) de 1,3 milhão hectares e do fundo trabalho (HA) de 131 milhões horas trabalhadas.

### 5.2.2 Setor Biomassa

A **Tabela 20** mostra o consolidado numérico de fluxos e fundos para o sistema energético biomassa de cana de açúcar com os compartimentos até o Nível n-3. Ver o resultado completo em Anexo.

**Tabela 20: Consolidado Biomassa (cana de açúcar)**

NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>					
	<b>BIOMASSA (cana de açúcar)</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	ETANOL	69	70	667.852	6.034	397.292
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>					
	<b>PRODUÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		44	-	-	6.032	101.637
NÍVEL n-3	PLANTIO	24	-	-	6.032	4.371
	COLHEITA	20	-	-	5.121	97.266
Nível n-4	Mecânica	20	-	-	3.916	4.849
	Manual	-	-	-	1.205	92.417
	<b>TRANSPORTE #1</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		10	-	-	-	64.178
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	RODOVIÁRIO	10	-	-	-	64.178
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		-	70	667.852	3	216.542
NÍVEL n-3	PEQUENA (< 2 milhões m³)	-	32	305.332	1	99.000
	MÉDIA ( 2 - 5 milhões m³)	-	34	320.188	2	103.817
	GRANDE (> 5 milhões m³)	-	4	42.332	0	13.726
	<b>TRANSPORTE #2</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		15	0	-	-	14.935
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	0	-	-	70
	HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	RODOVIÁRIO	15	-	-	-	14.864
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Nota:** PJ-therm = PJ energia térmica, PJ-eletric = PJ energia elétrica, W= Water (mil m³), LU = Land Use (mil hectares), HÁ = Human Activity (mil horas)

Assim, em 2015, para atender a demanda rodoviária de etanol (anidro e hidratado), foram necessários, no consolidado da cadeia deste combustível, um total do fluxo energia de 69 PJ-therm e 70 PJ-electr, do fluxo água (W) de 667 milhões m³, do fundo terra (LU) de 6 milhões hectares e do fundo trabalho (HA) de 397 milhões horas trabalhadas.

A **Tabela 21** mostra o consolidado numérico para o sistema energético biomassa de soja com os compartimentos até o Nível n-3. Ver o resultado completo em Anexo.



**Tabela 21: Consolidado Biomassa (soja)**

NÍVEL n-1	SISTEMA ENERGÉTICO						
		BIOMASSA (SOJA)	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		BIODIESEL	178	24	87.601	2.673	21.002
NÍVEL n-2	PROCESSOS						
	PRODUÇÃO		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			7	-	-	2.672	13.661
NÍVEL n-3	PLANTIO		3	-	-	2.672	-
	COLHEITA		4	-	-	2.659	-
Nível n-4	Mecânica		4	-	-	2.659	-
	Manual		-	-	-	-	-
	TRANSPORTE #1		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			15	-	-	-	2.871
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO		-	-	-	-	-
	HIDROVIÁRIO		-	-	-	-	-
	RODOVIÁRIO		15	-	-	-	2.871
	FERROVIÁRIO		-	-	-	-	-
	TRANSFORMAÇÃO		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			155	24	87.601	1	2.901
NÍVEL n-3	PEQUENA (100 mil m²)		3	1	1.865	0	62
	MÉDIA (100-200 mil m²)		54	8	30.530	0	1.011
	GRANDE (> 200 mil m²)		97	15	55.205	1	1.828
	TRANSPORTE #2		PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			2	-	-	-	1.570
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO		-	-	-	-	-
	HIDROVIÁRIO		-	-	-	-	-
	RODOVIÁRIO		2	-	-	-	1.570
	FERROVIÁRIO		-	-	-	-	-

Assim, em 2015, para atender a demanda rodoviária de biodiesel, foram necessários, no consolidado da cadeia deste combustível, um total do fluxo energia de 178 PJ-therm e 24 PJ-electr, do fluxo água (W) de 87 milhão m³, do fundo terra (LU) de 2,6 milhões hectares e do fundo trabalho (HA) de 21 milhões horas trabalhadas.

A seguir são consolidados os dendogramas (matrizes) dos fundos e fluxos e feita uma análise dos resultados.

## 5.3 Dendogramas

### 5.3.1 Dendogramas de FUNDOS

Nesta seção serão apresentadas as tabelas dos dendograma de fundo com os compartimentos até o Nível n-2. Para ver o resultado numérico completo com todos os níveis (Nível n-4), ver Anexo.

### 5.3.1.1 TERRA (LAND USE/LU)

A **Tabela 22** mostra a consolidação do fundo terra (LU) para o limite do sistema (Nível n), os setores energéticos (Nível n-1) e para os processos/etapas (Nível n-2). Cabe destacar que no caso específico da etapa de produção de biomassa, de modo a não incorrer no erro de dupla contagem, considerou-se a área de Plantio.<sup>81</sup> Ademais para esse fundo não foram considerados as etapas de transporte #1 e #2 (vide seção 4.2.1).

Em 2015 o sistema total para atender a demanda de combustíveis líquidos rodoviário ocupou uma área total de 10,0 milhões de hectares, sendo 1,3 milhão para gasolina/dieselA (13,52%), 6,0 milhões para o etanol (59,93%) e 2,6 milhões para o biodiesel (26,54%). Os biocombustíveis juntos somaram 8,6 milhões de hectares ou 86,44% da área do sistema (Nível n).

**Tabela 22: Dendograma Fundo LU (Land Use) em 2015 (mil ha e %)**

NÍVEL n	<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO (mil ha)</b>	LU				LU		
		10.068				100%		
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel	
		LU	LU	LU	LU	LU	LU	
		1.361	6.034	2.673	13,52%	59,93%	26,54%	
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>							
	<b>PRODUÇÃO</b>	LU	LU	LU	LU	LU	LU	
		1.354	6.032	2.672	13,45%	59,91%	26,53%	
	<b>TRANSPORTE #1</b>	LU	LU	LU	LU	LU	LU	
		-	-	-	0,00%	0,00%	0,00%	
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>	LU	LU	LU	LU	LU	LU	
		7	3	1	0,07%	0,03%	0,01%	
	<b>TRANSPORTE #2</b>	LU	LU	LU	LU	LU	LU	
		-	-	-	0,00%	0,00%	0,00%	

A etapa de produção, com os campos de petróleo *onshore* e *offshore* e com as terras utilizadas na produção agrícola de cana de açúcar e soja, correspondeu com praticamente o total da área em uso do sistema. A etapa de transformação com uma área em uso de 7 mil hectares para as refinarias (17 unidades), 3 mil hectares para as usinas mistas e destilarias

<sup>81</sup> Para não haver dupla contagem de área, plantio e colheita, considerou-se como a área de uso (LU) a área destinada ao plantio. Isto é a área total utilizada para as atividades de produção da biomassa.

(352 unidades) e mil hectares para as unidades produtoras de biodiesel (53 unidades), correspondeu com apenas 0,11% da ocupação do sistema.

Sob a ótica de produtividade, o MuSIASEM permite a observação dos indicadores de produção (PES e EC) por ocupação de área (vide **Tabela 23**). Na etapa de produção do recurso primário (PES), a maior produtividade (medida em tonelada produzida por hectare) foi na biomassa de etanol, com 59,85 t/ha, seguido do petróleo, com 45,87 t/ha e a biomassa de soja, com 3,02 t/ha.

Na etapa de produção da energia secundária (EC), as unidades produtoras de etanol (destilarias e usinas mistas) e as refinarias apresentaram maior produtividade por área, com respectivamente 11,1 mil m<sup>3</sup>/ha e 9,9 mil m<sup>3</sup>/ha. Na produção de biodiesel, produziu-se 3,0 mil m<sup>3</sup>/ha.

**Tabela 23: Indicadores do Fundo LU (Land Use) em 2015 (t/ha e m<sup>3</sup>/ha)**

	Gasolina/Diesel	Etanol	Biodiesel
PES (mil t)	62.113	361.001	8.074
t/ha	45,87	59,85	3,02
EC (mil m <sup>3</sup> )	71.978	29.729	3.140
m <sup>3</sup> /ha	9.992	11.081	3.018

A **Tabela 24** mostra o indicador final do fundo para os setores energéticos. Considerando o fundo terra por energético (Nível n-1) (**Tabela 22**) e as respectivas demandas dos combustíveis líquidos rodoviário, tem-se uma baixa produtividade de uso de terra nos biocombustíveis, com uma relação de 4,9 m<sup>3</sup>/ha no etanol e 1,2 m<sup>3</sup>/ha no biodiesel. No setor petróleo uma relação de 52,9 m<sup>3</sup>/ha.

**Tabela 24: Indicador Uso de área final**

	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
Combustível Rodoviário (mil m <sup>3</sup> )	71.978	29.729	3.140
m <sup>3</sup> /ha	52,87	4,93	1,17

### 5.3.1.2 TRABALHO (HUMAN ACTIVITY/HA)

A **Tabela 25** mostra a consolidação do fundo trabalho para o limite do sistema (Nível n), os setores energéticos (Nível n-1) e para as etapas (Nível n-2). Em 2015 o sistema para atender a demanda de combustíveis líquidos rodoviário demandou um total de 550 milhões de horas trabalhadas, sendo 131 milhões de horas para atender a demanda de gasolina/diesel (23,95%), 397 milhões para o etanol (72,23%) e 21 milhões para o biodiesel (3,82%). Os biocombustíveis juntos somaram 418 milhões horas trabalhadas ou 76,051% do total do sistema.

**Tabela 25: Dendograma Fundo HA (Human Activity) em 2015 (mil horas e %)**

NÍVEL n	COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO (mil horas)	HA					
		550.006					
NÍVEL n-1	SISTEMA ENERGÉTICO	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
		HA	HA	HA	HA	HA	HA
		131.712	397.292	21.002	23,95%	72,23%	3,82%
NÍVEL n-2	PROCESSOS						
	PRODUÇÃO	HA	HA	HA	HA	HA	HA
		62.463	101.637	13.661	11,36%	18,48%	2,48%
	TRANSPORTE #1	HA	HA	HA	HA	HA	HA
		3.948	64.178	2.871	0,72%	11,67%	0,52%
	TRANSFORMAÇÃO	HA	HA	HA	HA	HA	HA
		60.726	216.542	2.901	11,04%	39,37%	0,53%
	TRANSPORTE #2	HA	HA	HA	HA	HA	HA
		4.575	14.935	1.570	0,83%	2,72%	0,29%

Na etapa de produção da energia primária, tem-se para o petróleo, cana de açúcar e soja, respectivamente, a quantidade de 62,4 milhões horas (11,36%), 101,6 milhões horas (18,48%) e 13,6 milhões (2,48%) horas trabalhadas. Os valores encontrados para o fundo trabalho representam as particularidades setoriais dos recursos primários analisados. Na atividade de exploração e produção, identifica-se como o fator preponderante o uso da mão de obra nas áreas de produção de petróleo *offshore*, com 45,0 milhões de horas ou 72,1 % do total (vide tabela completa em Anexo). Na atividade agrícola de biomassa da cana de açúcar, o número de horas trabalhadas é puxado pela ainda elevada utilização da colheita manual, com 92,4 milhões horas e, na atividade agrícola da soja, apesar do plantio direto mecanizado, pelas grandes extensões de área a serem trabalhadas.

Na etapa de transporte #1, o setor de petróleo com um total de 3,9 milhões horas trabalhadas (0,72%) é pouco intensivo em mão de obra, haja visto que o transporte é feito pelos modais dutoviário (petróleos Bahiano e Cabiúnas) e hidroviário (demais petróleos). Já o transporte de cana de açúcar, em razão da quantidade de cana transportado (361 milhões t) e da utilização do modal rodoviário, observa-se um uso intensivo de mão de obra, com um total de 64,1 milhões de horas de trabalho (11,67%). O transporte de soja, já em quantidades menores para o mercado interno (8 milhões t), mas também concentrado no modal rodoviário, apresenta um uso de 2,8 milhões horas trabalhadas (0,52%).

Na etapa de transformação, como resultado dos indicadores de empregados/unidade produtiva apontados no capítulo anterior<sup>82</sup>, obteve-se uma maior utilização de mão-de-obra em horas trabalhadas, respectivamente para produção do etanol com 216,5 milhões horas (39,37%), gasolina/diesel com 60,7 milhões horas (11,04%) e biodiesel com 2,9 milhões hora (0,53%).

Na etapa de transporte #2, novamente o transporte de gasolina/diesel feito pelos modais dutoviário e aquaviário com um total de 4,5 milhões de horas de trabalho (0,83%) e o transporte rodoviário de biocombustíveis com um total de 14,9 milhões horas (2,72%) para o etanol e 1,6 milhões horas (0,29%) para o biodiesel.

Sob a ótica de produtividade, o MuSIASEM permite a observação dos indicadores de produção (PES e EC) por horas trabalhadas (vide **Tabela 26**). Na produção do recurso primário (PES), a maior produtividade (medida em tonelada produzida por hora) foi na biomassa de cana de açúcar, com 3,55 t/hora, seguido do petróleo, com 0,99 t/hora e a biomassa de soja, com 0,59 t/hora. Não obstante a biomassa de cana de açúcar ainda ser colhida pelo método manual, a sua produtividade por área ainda é maior que a da cultura da soja.

Na produção da energia secundária (EC), as unidades produtoras de biodiesel apresentaram o melhor indicador de produtividade, com 1,36 m<sup>3</sup>/hora, seguido das refinarias com 1,19 m<sup>3</sup>/hora e as unidades produtoras de etanol com 0,14 m<sup>3</sup>/hora. Este resultado se justifica sobretudo pela distribuição do tamanho das unidades produtoras<sup>83</sup>. As unidades produtoras de biodiesel são concentradas em unidades grandes (> 200 mil m<sup>3</sup>), que

---

<sup>82</sup> Estimativas com base em PNAD/IBGE (2012). Vide seções 4.3.2.3, 4.4.2.3 e 4.4.3.3.

<sup>83</sup> Economia de escala.

representaram em 2015 aproximadamente 63% do total (vide tabela completa em Anexo). Já as refinarias são concentradas em unidades médias (5-10 mil m<sup>3</sup>), que representaram 60% do total. E as unidades produtoras de etanol (destilarias e usinas mistas), são predominantemente pequenas (< 2 milhões m<sup>3</sup>) e médias (2-5 milhões m<sup>3</sup>), com 93,7% do total.

**Tabela 26: Indicadores de produtividade em 2015 (t/hora e m<sup>3</sup>/hora)**

	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
PES (mil t)	62.113	361.001	8.074
t/hora	0,99	3,55	0,59
EC (mil m <sup>3</sup> )	71.978	29.729	3.140
m <sup>3</sup> /hora	1,19	0,14	1,36

No consolidado, incluindo as atividades de transporte #1 e #2, a **Tabela 27** mostra o indicador final de produtividade. Considerando todo o fundo trabalho (Nível n-1) (**Tabela 25**) e as respectivas demandas dos combustíveis líquidos rodoviário, tem-se como resultado final uma baixa produtividade do trabalho nos biocombustíveis, com uma relação de 0,07 m<sup>3</sup>/hora no etanol e 0,15 m<sup>3</sup>/hora no biodiesel. No setor petróleo uma relação de 0,55 m<sup>3</sup>/hora. Esta piora no indicador de produtividade do trabalho para os biocombustíveis quando da inclusão das atividades de transporte ocorre em decorrência destes serem basicamente realizados pelo modal rodoviário.

**Tabela 27: Produtividade do trabalho final**

	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
Combustível Rodoviário (mil m <sup>3</sup> )	71.978	29.729	3.140
m <sup>3</sup> /hora	0,55	0,07	0,15

### 5.3.2 Dendogramas de FLUXOS

Nesta etapa serão apresentadas as tabelas dos dendograma de fluxo no Nível n-2. Para ver o resultado numérico em todos os níveis (Nível n-4), ver tabela completa em anexo.

### 5.3.2.1 ENERGIA

A **Tabela 28** mostra a consolidação do fluxo energia para o limite do sistema (Nível n), os setores energéticos (Nível n-1) e para as etapas (Nível n-2). Em 2015 o sistema para atender a demanda de combustíveis líquidos rodoviário demandou-se um total de 523,1 PJ-therm e 95,7 PJ electr. Na energia térmica, 276,2 PJ (52,80%) na gasolina/diesel, 69,3 PJ (13,26%) no etanol e 177,52 PJ (33,94%)

**Tabela 28: Dendograma Fluxo Energia em 2015 (PJ e %)**

NÍVEL n	COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO (PJ)					
		PJ-therm	PJ-electr			
		523,08	95,70			
NÍVEL n-1	SISTEMA ENERGÉTICO	Gasolina/Diesel		Etanol		Biodiesel
		PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		276,21	1,43	69,35	70,41	177,52 23,87
NÍVEL n-2	PROCESSOS					
	PRODUÇÃO	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		88,44	0,02	44,39	-	6,70 -
	TRANSPORTE #1	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		19,24	0,00	10,33	-	14,67 -
	PRODUÇÃO INDUSTRIAL	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		168,46	1,41	-	70,41	154,60 23,87
	TRANSPORTE #2	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		0,07	0,00	14,63	0,00	1,54 -
		PJ-therm	PJ-electr			
		100%	100%			
NÍVEL n-1	SISTEMA ENERGÉTICO	Gasolina/Diesel		Etanol		Biodiesel
		PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		52,80%	1,49%	13,26%	73,57%	33,94% 24,94%
NÍVEL n-2	PROCESSOS					
	PRODUÇÃO	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		16,91%	0,02%	8,49%	0,00%	1,28% 0,00%
	TRANSPORTE #1	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		3,68%	0,00%	1,98%	0,00%	2,81% 0,00%
	PRODUÇÃO INDUSTRIAL	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		32,21%	1,48%	0,00%	73,57%	29,56% 24,94%
	TRANSPORTE #2	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm	PJ-electr	PJ-therm PJ-electr
		0,01%	0,00%	2,80%	0,00%	0,30% 0,00%

Na etapa de produção da energia primária, no setor energético do petróleo tem-se o consumo energético de gás natural nas plataformas, para os equipamentos estacionários (alocado em energia térmica) e de óleo diesel, para a geração de eletricidade. Nos setores energéticos de biomassa, tem-se o consumo de diesel nas atividades agrícolas de plantio (máquinas e tratores) e colheita mecanizada. Assim, nesta etapa o fluxo de energia térmica

foi de 88,4 PJ-therm (16,91%) para a gasolina/diesel, 44,4 PJ-therm (8,49%) para o etanol e 6,7 PJ-therm (1,28%) para o biodiesel. O fluxo de energia elétrica de 0,02 PJ-electr para o petróleo.

Na etapa de transporte (#1), do recurso primário (PES) para os centros de transformação, ocorre o consumo térmico do combustível bunker (óleo diesel + óleo combustível) no transporte hidroviário, do combustível óleo diesel no transporte rodoviário, e o consumo de eletricidade no transporte dutoviário. Como resultado, o setor petróleo apresentou um consumo de energia no transporte hidroviário de 19,2 PJ-therm (3,68%) e dutoviário de 0,7 GJ-electr. Os setores energéticos de cana de açúcar e soja com um consumo rodoviário, respectivamente, de 10,3 PJ-therm (1,98%) e 14,7 PJ-therm (2,81%).

Na etapa de transformação, no sistema energético de petróleo as refinarias apresentaram um consumo próprio (resíduos de processo como gás de refinaria, coque e óleos residuais) de 168,5 PJ-therm (32,21%) e 1,4 PJ-electr (1,48%). No sistema energético do etanol, as destilarias e usinas mistas consumiram 70,4 PJ-electr (73,57%), gerados internamente através da queima do bagaço de cana de açúcar. No sistema energético do biodiesel, as unidades produtoras consumiram eletricidade, cavacos de madeira e diesel (etapas de processamento da soja e de extração do óleo bruto de soja) que totalizaram um consumo térmico de 154,6 PJ therm (29,56%) e 23,87 PJ electr (24,94%). Cabe destacar que no refino e na produção de etanol a demanda de energia é atendida por autoprodução, e portanto, são autossuficientes do ponto de vista energético. Todavia, sob a ótica de utilização de recursos do sistema, por se tratarem de recursos físicos (bagaço e resíduos de processo) que poderiam ter outra destinação (outros usos dentro do sistema) e estão sendo alocados (de forma otimizada) no consumo da própria cadeia, são considerados na consolidação final do dendograma.

Na etapa de transporte (#2) dos combustíveis líquidos rodoviário às bases primárias, tem-se no setor petróleo o consumo hidroviário de 0,07 PJ-therm de bunker e dutoviário de 2,4 GJ-electr, no setor de etanol o consumo rodoviário de 14,6 PJ-therm e dutoviário de 0,1 GJ-electr, e no setor de biodiesel o consumo rodoviário de 1,5 TJ-therm.

Sob a ótica de intensidade energética, o MuSIASEM permite a observação do consumo de energia por unidade produzida de energia primária (PES) e secundária (EC) (vide **Tabela 29**). Na produção do recurso primário (PES), em termos de energia térmica o



setor mais energointensivo é o de exploração e produção de petróleo com 1,42 TJ/t, seguido pela soja com 0,83 TJ/t e a cana de açúcar com 0,12 TJ/t. Em termos de energia elétrica, o setor petróleo com um consumo de 0,25 GJ-electr/t.

Na produção da energia secundária (EC), as unidades produtoras de biodiesel apresentaram a maior intensidade de uso tanto no consumo de energia térmica, com 49,2 TJ/m<sup>3</sup>, quanto no consumo de energia elétrica, com 7,6 TJ/m<sup>3</sup>. Este resultado se justifica pelo intenso consumo de cavaco de madeira nas atividades de processamento da soja e extração do óleo bruto de soja (vide seção 4.4.3.3).

**Tabela 29: Indicadores de intensidade energética**

	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
PES (mil ton)	62.113	361.001	8.074
TJ-therm/t	1,42	0,12	0,83
GJ-electr/t	0,25	-	-
EC (mil m <sup>3</sup> )	71.978	29.729	3.140
TJ-therm/m <sup>3</sup>	2,34	-	49,24
TJ-electr/m <sup>3</sup>	0,02	2,37	7,60

No consolidado, incluindo as atividades de transporte #1 e #2, a **Tabela 30** mostra o indicador de intensidade energética final. Considerando todo o fundo trabalho (Nível n-1) ( **Tabela 28** ) e as respectivas demandas dos combustíveis líquidos rodoviário, tem-se como resultado final o ciclo do biodiesel como o mais energointensivo tanto em energia térmica (0,06 PJ/m<sup>3</sup>) quanto em energia elétrica (0,01 PJ/m<sup>3</sup>). Esta intensidade energética térmica final é intensificada pelo elevado consumo de diesel no transporte da soja até os centros transformadores (grandes distancias percorridas)<sup>84</sup>.

<sup>84</sup> Enquanto a cana de açúcar percorre distancias médias de 20km (CONAB, 2017), a soja percorre distancias médias de 200 km (MTPA, 2017).

**Tabela 30: Intensidade energética final**

	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
Combustível Rodoviário (mil m³)	71.978	29.729	3.140
PJ-therm/m³	0,004	0,002	0,057
PJ-electr/m³	0,000	0,002	0,008

E por fim, na análise do fundo de energia, tem-se a parcela do diesel final destinado ao transporte rodoviário utilizado no próprio transporte rodoviário de carga da biomassa e combustíveis (*hypercycle*). Isto é, o consumo de diesel final em caminhões para o transporte dos recursos primários de cana de açúcar e soja e para o transporte das energias secundárias etanol e biodiesel. Como resultado, estimou-se um consumo de 25 PJ-therm no transporte #1 e 17 PJ-therm no transporte #2, totalizando 42 PJ-therm ou 7,9% do total do sistema (Nível n). Assim, pode-se dizer que aproximadamente 8% do sistema energético de combustíveis líquidos rodoviários é para autoconsumo. Como exercício numérico, quando se adiciona a utilização do diesel para o consumo de tratores e máquinas agrícolas <sup>85</sup> da etapa de plantio e colheita de cana de açúcar e soja, estima-se um *hypercycle* da ordem de 92 PJ-therm ou 17,6% do sistema total.

#### 5.3.2.2 ÁGUA (Water/W)

A **Tabela 31** mostra a consolidação do fluxo água para o limite do sistema (Nível n), os setores energéticos (Nível n-1) e para as etapas (Nível n-2). Cabe destacar que por questão conceitual e de uniformização dos dados, considerou-se apenas o consumo de água azul (vide seção 4.2.1).<sup>86</sup> Em 2015 o sistema demandou 810 milhões m³ de água, sendo 54 milhões para gasolina/diesel (6,77%), 667 milhões (82,42%) para etanol e 87 milhões (10,81%) para o biodiesel. Os biocombustíveis juntos somaram 755 milhões ou 93,23% do sistema.

<sup>85</sup> O consumo de tratores e máquinas agrícolas, apesar de se tratarem de veículos motorizados, são considerados sob a ótica de Balanço Energético em consumo final agropecuário.

<sup>86</sup> Ressaltando que as estimativas de água verde, na produção de biomassa, e água não descartada na produção de petróleo foram apresentadas no capítulo anterior, caso o leitor queira incluir e considerar em suas posteriores análises.

**Tabela 31: Dendograma Fluxo Água em 2015 (mil m³ e %)**

NÍVEL n	<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO (mil m³)</b>						
		W			W		
		810.317			100%		
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
		W	W	W	W	W	W
		54.864	667.852	87.601	6,77%	82,42%	10,81%
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>						
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>	W	W	W	W	W	W
		54.864	667.852	87.601	6,77%	82,42%	10,81%

No consolidado, considerando todo o fluxo de água (Nível n-1) (**Tabela 31**) e as respectivas demandas dos combustíveis líquidos, tem-se um uso intensivo de água nos biocombustíveis, com um fluxo 27,90 m³ água/m³ biodiesel, 22,46 m³ de água/m³ etanol. Na atividade de processamento do etanol, sobretudo, por incluir um consumo adicional de quase 10% (FIESP, 2009) devido o uso da água para a lavagem da cana de açúcar colhida manualmente. No setor petróleo o consumo foi de 0,76 m³ água/ m³ gasolina/diesel (**Tabela 32**)

**Tabela 32: Consumo específico de água**

	Gasol/Diesel	Etanol	Biodiesel
Combustível Rodoviário (mil m³)	71.978	29.729	3.140
m³ água/m³	0,76	22,46	27,90

#### 5.4 Consolidação dos Fundos e Fluxos nos Setores Energéticos (Nível n-1)

A **Tabela 33** mostra a consolidação dos fundos e fluxos sob a ótica dos Sistemas Energéticos. Do lado esquerdo da tabela os valores nominais: PJ energia (therm e eletrc), mil m³ água (W), mil hectares uso de área (LU), mil horas de trabalho (HA) e volume de combustíveis (mil m³). Do lado direito da tabela os indicadores representando a relação entre os fundos e fluxos por unidade de combustível (m³ do combustível).

**Tabela 33: Consolidação dos fundos e fluxos: comparação dos Sistemas Energéticos**

↓	↓	↓	↓	↓	↓
PJ-therm	PJ-electr	W	PJ-therm	PJ-electr	W
276	1,43	54.864	0,004	0,000	0,762
	1.361	131.712	-	0,019	1,830
	LU	HA		LU	HA
	↑	↑		↑	↑
<b>Gasol/diesel (mil m³)</b>					
		<b>71.978</b>			
↓	↓	↓	↓	↓	↓
PJ-therm	PJ-electr	W	PJ-therm	PJ-electr	W
69	70	667.852	0,002	0,002	22,465
	6.034	397.292	-	0,203	13,364
	LU	HA		LU	HA
	↑	↑		↑	↑
<b>Etanol (mil m³)</b>					
		<b>29.729</b>			
↓	↓	↓	↓	↓	↓
PJ-therm	PJ-electr	W	PJ-therm	PJ-electr	W
178	24	87.601	0,057	0,008	27,903
	2.673	21.002	-	0,851	6,690
	LU	HA		LU	HA
	↑	↑		↑	↑
<b>Biodiesel (mil m³)</b>					
		<b>3.140</b>			

No lado direito da **Tabela 33** (indicadores), sob a ótica de fundos, observa-se praticamente uma evolução dos indicadores para o uso de área (LU) e trabalho (HA). Para uso de área (LU), os sistemas energéticos gasolina/diesel, etanol e biodiesel, respectivamente, com um indicador de uso de área por m³ de combustível de 0,02 ha/m³ para gasolina/diesel, 0,20 ha/m³ para o etanol e 0,85 ha/m³ para o biodiesel. Para o uso de trabalho (mão de obra), com um indicador da necessidade de horas por m³ combustíveis de 1,83 horas/m³ de gasolina/diesel, 13,36 horas/m³ de etanol e 6,69 horas/m³ de biodiesel.

A análise dos fundos corrobora os valores já apontados nos itens anteriores, os quais mostraram o uso intensivo de terra e a baixa produtividade do trabalho para os biocombustíveis, sobretudo o biodiesel, contrastando com o baixo uso de terra e a alta produtividade do trabalho no setor petróleo. Grande parte desse resultado se explica pelo fato de a atividade de exploração e produção de petróleo ser bastante intensiva em tecnologia,

enquanto as atividades agrícolas, apesar de terem em sua maioria a colheita mecanizada, ainda são atividades em processo de modernização e que fazem uso de recursos primários agrícolas (biomassa).

No lado direito da **Tabela 33**, sob a ótica de fluxos, observam-se os indicadores de energia (PJ-therm e PJ-electr) e água (W). Nos fluxos de energia, o biodiesel como o ciclo mais energointensivo, tanto no uso de energia térmica ( $0,06 \text{ therm/m}^3$ ) quanto no uso de energia elétrica ( $0,008 \text{ electr/m}^3$ ). Nos fluxos de água, o uso intensivo nos biocombustíveis com  $22,46 \text{ m}^3 \text{ água/m}^3$  etanol e  $27,90 \text{ m}^3 \text{ água/m}^3$  biodiesel. No setor petróleo o indicador de consumo de água foi bem abaixo, de  $0,76 \text{ m}^3/\text{m}^3$  gasolina e diesel.

E para finalizar a consolidação dos fluxos e fundos para o limite do sistema (Nível n), o indicador da relação destes com o total de combustíveis líquidos rodoviários. Um fluxo energético de  $0,005 \text{ PJ therm/ m}^3$  e  $0,001 \text{ PJ-electr/m}^3$ , um fluxo de água de  $7,73 \text{ m}^3\text{água/m}^3$ , um fundo de terra de  $0,10 \text{ ha/m}^3$  e um fundo de trabalho de  $5,25 \text{ horas/m}^3$  (**Tabela 34**).

**Tabela 34: Consolidação final dos fundos e fluxos**

	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	PJ/m <sup>3</sup>	PJ/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	ha/m <sup>3</sup>	horas/m <sup>3</sup>
Combustíveis Líquidos Rodoviários	0,005	0,001	7,73	0,10	5,25

Assim, encerra-se neste capítulo a apresentação dos resultados e análises de cada fundo e fluxo específico para cada etapa (produção/transporte/transformação/transporte) dos setores energéticos. A abordagem do MuSIASEM foi pela primeira vez aplicada ao caso brasileiro cobrindo um estudo de todos os elementos – mão de obra, terra, energia e água, e abrangendo toda a cadeia do setor petróleo e de biomassa de cana de açúcar e soja. A grande virtude do método se apresentou na inteligibilidade de composição dos indicadores, não obstante a dificuldade para obtenção da base de dados. Como ferramenta de análise, possibilitou a criação de indicadores de leitura intuitiva e que conseguiram expor as diferenças entre os setores energéticos analisados.

## 6 Conclusões

A seguir são apresentadas as considerações finais deste estudo, através de um breve resumo de todos os capítulos presentes no estudo, uma discussão dos resultados obtidos e a conclusão do mesmo, explicitando as vantagens e desvantagens e considerações para trabalhos futuros.

O objetivo do presente estudo foi analisar o impacto da cadeia dos combustíveis líquidos rodoviário (gasolina/diesel, etanol e biodiesel) sobre o sistema socioeconômico e físico em que estão inseridos, neste caso, no Brasil, através da mensuração da necessidade dos elementos de fundo terra e trabalho e elementos de fluxo água e energia.

Assim, no capítulo 1 foi feita uma apresentação do panorama da cadeia de combustíveis líquidos do modal rodoviário, destacando-se a participação do transporte rodoviário no consumo energético total do país e a conjuntura atual numérica das cadeias (setor petróleo e biomassa de cana de açúcar e soja).

Nos capítulos 2 e 3, apresentou-se a discussão teórica do pensamento da bioeconomia de Georgescu Roegen e foram discutidas algumas metodologias disponíveis para realizar o objeto de estudo da tese, como os métodos Insumo Produto (IP), Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e multi integrado (nexus).

Nos Capítulos 4 e 5 realizou-se a aplicação do MuSIASEM através de uma extensa coleta de dados, a construção da gramática e se apresentaram os resultados das estimativas dos fundos terra (*Land Use/LU*) e trabalho (*Human Activity/HA*) e fluxos energia (PJ-therm e PJ-electr) e água (*Water/W*), bem como os valores físicos de energia primária (*Primary Energy Source/PES*) e energia secundária (*Energy Carriers/EC*) no decorrer da cadeia e os indicadores.

A aplicação do MuSIASEM apresentou como resultado para os biocombustíveis, quando comparados aos combustíveis fósseis, uma baixa produtividade do trabalho, um uso intensivo de terra, energointensivos em termos térmicos e elétricos e grandes consumidores de água.

Para o fundo trabalho, os biocombustíveis com uma produtividade média de 0,08 m<sup>3</sup>/horas, sendo a produtividade do setor energético do etanol de 0,07 m<sup>3</sup>/hora e do biodiesel

de 0,15 m<sup>3</sup>/hora. No setor petróleo uma relação de 0,55 m<sup>3</sup>/hora. Assim, a produtividade da cadeia do setor petróleo se apresentou 7 vezes maior que a produtividade da cadeia dos biocombustíveis. Sob a ótica da quantidade de horas trabalhadas, estimou-se que os biocombustíveis necessitam de 11 horas a mais que o setor petróleo para produzir uma unidade de combustível.

Para o fundo terra, tem-se novamente uma baixa produtividade do uso de terra nos biocombustíveis, com uma produtividade média 3,77 m<sup>3</sup>/ha, sendo a produtividade do setor energético do etanol de 4,93 m<sup>3</sup>/ha e do biodiesel de 1,17 m<sup>3</sup>/ha. No setor petróleo uma relação de 52,87 m<sup>3</sup>/ha. Assim, a produtividade da cadeia do setor petróleo se apresentou 14 vezes maior que a produtividade da cadeia dos biocombustíveis. Sob a ótica da quantidade de área ocupada, estimou-se que os biocombustíveis necessitam de 0,25 hectares de área a mais que o setor petróleo para produzir uma unidade de combustível.

Para o fluxo energia, tem-se como resultado o ciclo dos biocombustíveis mais energointensivos que o ciclo da gasolina/diesel em termos térmicos e elétricos. Os biocombustíveis com uma demanda térmica média de 0,008 PJ/m<sup>3</sup>, sendo o consumo do setor energético do etanol de 0,002 PJ/ m<sup>3</sup> e do biodiesel de 0,057 PJ/m<sup>3</sup>. No setor petróleo uma relação de 0,004 PJ/m<sup>3</sup>. Assim a intensidade de uso da energia foi aproximadamente 2 vezes maior na cadeia de biocombustíveis que na cadeia do setor petróleo. No consumo de energia elétrica, os biocombustíveis com uma demanda média de 0,003 PJ/m<sup>3</sup>, sendo o consumo do setor energético do etanol de 0,002 PJ/ m<sup>3</sup> e do biodiesel de 0,008 PJ/m<sup>3</sup>. No setor petróleo uma relação de 0,02 TJ/m<sup>3</sup>. Assim a intensidade de uso da energia elétrica foi de 144 vezes maior na cadeia de biocombustíveis que na cadeia do setor petróleo. Em uma visão sistêmica, de consumo próprio (*hypercycle*), aproximadamente 8% da demanda final de energia do transporte rodoviário retorna para abastecer a cadeia dos combustíveis rodoviários.

Para o fluxo água, tem-se um uso intensivo de água nos biocombustíveis, com um fluxo médio de 22,98 m<sup>3</sup> água/m<sup>3</sup>, sendo no setor energético do etanol de 22,46 m<sup>3</sup> água/m<sup>3</sup> e do biodiesel de 27,90 m<sup>3</sup> água/m<sup>3</sup>. No setor petróleo o consumo foi de 0,76 m<sup>3</sup> água/ m<sup>3</sup> gasolina/diesel. Assim a intensidade de uso da água foi 30 vezes maior na cadeia de biocombustíveis que na cadeia do setor petróleo.

Assim sendo, os resultados dos indicadores apontaram uma menor atratividade dos biocombustíveis quando comparados a gasolina/diesel. São indicadores com menor produtividade de trabalho e uso da terra e maior intensidade de uso de energia e água que os indicadores apresentados para os derivados de origem fóssil.

Para elaboração do estudo a autora se deparou com uma série de dificuldades em termos de obtenção de dados. No que se refere ao fundo terra, na etapa de produção, premissas tiveram que ser adotadas para estimar a área de uso das atividades de exploração e produção de petróleo *onshore* e *offshore*. Nas etapas de transporte (#1 e #2), em razão da imensidade logística que envolve o transporte hidroviário e rodoviário, optou-se por desconsiderar a análise deste fundo. Na etapa de transformação, no caso das refinarias de petróleo, foi um processo extensivo de coleta da informação, haja visto que as mesmas não estavam disponíveis de forma organizada.

No fundo trabalho se encontrou a maior dificuldade de informação deste trabalho. Praticamente não há informação sobre a quantidade de mão de obra requerida nas atividades produtivas e de transporte da cadeia do setor petróleo e biomassa. A exceção das informações de horas trabalhadas na atividade de exploração e produção de petróleo (ANP, 2015) e de número de trabalhadores nas atividades agrícolas da biomassa de cana de açúcar (CONAB, 2017), todas as demais atividades foram estimadas. Foi uma pesquisa extensa de modo a encontrar valores que de alguma forma contribuíssem para uma estimativa. Para cada caso foi proposta uma alternativa, mas cabe destacar, que se refere a parte mais frágil da tese. As estimativas de horas trabalhadas aqui estimadas, sobretudo no transporte, devem ser utilizadas em outras pesquisas com ressalvas.

No fluxo energia, ao contrário dos fundos terra e trabalho, encontrou-se uma série de valores, indicadores e estudos setoriais com estimativas de consumos específicos. A dificuldade maior foi dentro de uma imensidade de dados identificar aquelas informações mais adequada à construção deste estudo. Em virtude de o escopo deste estudo envolver 4 processos diferentes (produção/transporte/transformação/transporte) para três sistemas energéticos diferentes (petróleo, cana de açúcar e soja), exigiu-se um aprofundamento de diferentes processos, por exemplo, do processamento da soja e da cana, bem como o



manuseio de dados em diferentes escalas, métricas, etc. Dentre os fundos e fluxos foi o elemento que mais exigiu aprofundamento técnico e atenção às unidades trabalhadas.

No fluxo água, foram encontradas mais informações para o setor de biomassa, visto que existe uma área da literatura especializada na pegada hídrica e que usualmente faz comparações entre as culturas de biomassa. Para este fluxo, optou-se por uniformizar o conceito e utilizou-se como referência o consumo de água azul.

A autora identificou como maiores vantagens e desvantagens da abordagem adotada os seguintes pontos:

#### Vantagens:

- Flexibilidade de desenvolvimento da gramática: como a inter-relação entre as variáveis e a abertura dos compartimentos (níveis) é livre, a autora teve a liberdade de identificar as melhores informações e/ou dados mais confiáveis, para a partir de então propor a constituição da gramática. Ou seja, uma atividade *a posteriori* (de dados) definindo *a priori* os compartimentos;
- Nível de abertura: visto que se refere basicamente à aplicação conceitual da bioeconomia ao objeto de estudo, o MuSIASEM pode ser utilizado para análises macro (por exemplo, impacto sobre o sistema) e análises micro (por exemplo, importância da colheita mecanizada);
- Interação de informações *top-down* e *bottom-up*: através do método contábil, a ferramenta permite que se utilizem informações *top-down*, como Balanços Energéticos, dados oficiais (ANP, Ministérios, etc), dados de institutos (CONAB, AVIOVE, FIESP, EMPRAPA, IBGE), dados de empresas (Petrobras), e informações setoriais *bottom-up* (informações de rendimento, máquinas, etc).

#### Desvantagens:

- Coleta de dados: o método contábil traz consigo a desvantagem de exigir uma elevada quantidade de dados setoriais para compor as matrizes finais;

- Nomenclatura própria: a originalidade da ferramenta também foi verificada sob a ótica de nomenclatura. Todavia, isto dificulta a absorção da lógica da ferramenta, que passa a exigir um esforço adicional de incorporação dos novos conceitos (da bioeconomia) e de assimilação com os conceitos tradicionais já trabalhados nos demais modelos;
- A própria flexibilidade do método, ao permitir a criação de uma base comparativa em termos próprios, dificulta a comparação dos resultados com outros métodos. A consideração de algumas premissas de alocação, bem como a utilização de dados setoriais específicos, torna os resultados comparáveis apenas dentro do próprio método. Por exemplo, para se comparar os resultados com o trabalho de MACEDO (2008), haveria de se considerar diferenças de alocação, ano base e extensão/limite dos usos diretos e indiretos dos elementos de fundo e fluxos.

Alguns pontos de vantagem e desvantagem podem variar conforme o escopo do trabalho. A percepção da autora foi que o objeto de estudo da tese foi demasiadamente extenso, ou audacioso para o tipo de ferramenta, o que exigiu um esforço grande na coleta de dados. Para considerações futuras de trabalho, verificou-se que seria mais produtivo não abordar o tema sobre a lógica de processos. Estudos comparando culturas, regiões, países, setores, atividades, aparentemente sugerem apresentar uma exigência maior de análise da informação do que em coleta dos dados.

## 7 Referências bibliográficas

- ABIOVE, 2017. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Disponível em: [www.abiove.org.br](http://www.abiove.org.br).
- ANHOLETO, C.D., MASSUQUETTI, A., 2014. A soja brasileira e gaúcha no período 1994-2010: uma análise da produção, exportação, renda e emprego. 7º encontro de economia gaúcha. Agricultura Familiar e Desenvolvimento Rural.
- ANP, 2015. Fluxos logísticos de produção, transporte e armazenagem de gasolina A e de óleo diesel A no Brasil. Mapeamento, diagnóstico dos fatores de risco e ações de mitigação. Séries Temáticas ANP - nº 6.
- ANP, 2016. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2015. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br).
- ANP, 2016b. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural – Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Dezembro 2015 / Número 64.
- ARAGÃO, A., 2005. Estimativa da Contribuição do Setor. Petróleo ao Produto Interno Bruto Brasileiro: 1955/2004 [Rio de Janeiro], 152 p. Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético.
- ARAGÃO, A., GIAMPIETRO, M., 2016. An integrated multi-scale approach to assess the performance of energy systems illustrated with data from the Brazilian oil and natural
- ARAÚJO, M. G., 2013. Modelo de avaliação do ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil. Rio de Janeiro, Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético.
- ARENA, A. P., PIASTRELLINI, R. E CIVIT, B., 2011. Water Footprint of soybean production in Argentina. Life Cycle Management Conference, Berlim, Alemanha.
- BARROS, C.C., WANKE, P.F., 2012. Logística de distribuição de etanol: uma proposta de avaliação para a viabilidade na construção de alcooldutos a partir do centro oeste do Brasil. Centro de Estudos em Logística, Infraestrutura e Gestão – CELIG/COPPEAD.
- BECOTEPS, 2011. THE EUROPEAN BIOECONOMY IN 2030. Delivering Sustainable Growth by addressing the Grand Societal Challenges. Bio-Economy Technology Platforms.
- BERGH, J.C.J.M., 2016. Ecological (vs Environmental) Economics. ICREA, Barcelona. Institute for Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona. Slides da disciplina Ecological Economics.
- BERTALANFFY, L. V., 1975. Teoria Geral dos Sistemas. Ed. Vozes; 1975
- BIGGS *et al*, 2015. Sustainable development and the water–energy–food nexus: A

- perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy* 54 (2015) 389–397.
- BLANCO, V. L., 2006. Diagnóstico de emissões de gases de efeito estufa em plataformas FPSO. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- BLENINGER, T., KOTSUKA, L. K., 2015. Conceitos de água virtual e pegada hídrica: estudo de caso da soja e óleo de soja no Brasil. *Recursos Hídricos*. Vol. 36 Issue 1, p15-24. 10p.
- BORZONI, Matteo (2011). "Multi-scale integrated assessment of soybean biodiesel in Brazil". *Ecological Economics. Special Section - Earth System Governance: Accountability and Legitimacy*. 70 (11): 2028–2038. doi:10.1016/j.ecolecon.2011.06.002.
- CANCHUMANI, G. A.L., 2013. Óleos Lubrificantes Usados: um Estudo de Caso de Avaliação de Ciclo de Vida do Sistema de Refino no Brasil. Rio de Janeiro, Tese de doutorado. UFRJ/COPPE/ Programa de Planejamento Energético.
- CARPINTERO, O., 2006. La bioeconomia de Georgescu-Roegen. Montesinos Ensayo. Impreso en España.
- CASTELO BRANCO, D. A., 2012. Avaliação do real potencial de redução das emissões de CO2 equivalente com uso da captura em uma UTE a carvão/ David Alves Castelo Branco. - Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, Tese (doutorado) Programa de Planejamento Energético.
- CECHIN, A. D., 2008. Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema? São Paulo: USP. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, 2008.
- CECHIN, A.D., VEIGA, J.E., 2010. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu Roegen. *Revista de Economia Política*, vol. 30, nº 3 (119), pp. 438-454, julho-setembro/2010.
- CHOI, JUN-KI; BAKSHI, B.R , HAAB, T.; 2010. Effects of a carbon price in the U.S.on economic sectors, resource use, and emissions: An input–output approach. *Energy Policy* 38(2010)3527–3536.
- CLEVELAND, C. J., 1987. Biophysical economics: historical perspective and current research trends. *Ecological Modelling*, 38 (47-73). Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands.
- CLEVELAND, C. J., 1999. 'Biophysical economics: From physiocracy to ecological economics and industrial ecology', in J. Gowdy and K. Mayumi (eds) *Bioeconomics and Sustainability: Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, pp125–154.
- CONAB, 2017. Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil - Edição para a safra 2014/15. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília.
- D'ALISA G., DI NOLA M.F., GIAMPIETRO M. 2012. A multi-scale analysis of urban

- waste metabolism: density of waste disposed in Campania. *Journal of Cleaner Production* 35: 59-70.
- DAI G, YAN L J, GUO H W, ZHANG G. 2015. Societal metabolism analysis of China's four municipalities based on MSIASM theory and carbon emissions from energy consumption. *Acta Ecologica Sinica*, 35(7):2184-2194.
- DECOPE, 2014. Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços. Departamento de Custos Operacionais, Estudos Técnicos e Econômicos do Transporte Rodoviário de Cargas/DECOPE.
- DELF, 2013. Emissions of pipeline transport compared with those of competing modes. The Netherlands.
- DET, 2013. Department of Energy Technology. <https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/desa/desa-news/clews-article-published-in-nature-climate-change-july-2013-issue-1.399559>.
- DIAZ-MAURIN F. AND GIAMPIETRO M. 2013. A “grammar” for assessing the performance of power-supply systems: comparing nuclear energy to fossil energy. *Energy* 49: 162–177.
- DIAZ-MAURIN, FRANÇOIS; KOVACIC, Z., 2015. "The unresolved controversy over nuclear power: A new approach from complexity theory". *Global Environmental Change*. 31 (C): 207–216. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.014.
- DIEPOLDER, P., 2012. “Is “zero discharges” realistic?”, *Hydrocarbon Processing*, v. 71, pp. 129-131.
- ELY, R., 2015. Advanced input output techniques for assessing direct and indirect economic impacts of sugarcane conversion technologies. Tese de Doutorado. PPE/UFRJ/
- EMBRAPA, 2015. Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. Documentos n.171. 2ª Edição. Londrina
- EPE, 2005. Potencial de Redução de Emissões de CO<sub>2</sub> em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis. Estudos EPE- Convênio no 039/2005.
- EPE, 2012. Consolidação de bases de dados do setor transporte: 1970-2010. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/>
- EPE, 2016. Balanço Energético Nacional 2016: Ano Base 2015. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília, Brasil. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br).
- EPL, 2017. Transporte inter-regional de carga no Brasil. Panorama 2015. Carregamento com a matriz origem-destino. Plano Nacional de Logística Integrada – PNLI. Empresa de Planejamento e Logística S.A. Disponível em: <http://www.epl.gov.br/>.
- ERCIN, A. E., HOEKSTRA, A. Y., 2012 - Carbon and Water Footprints: Concepts, methodologies and policy responses. Unitec Nations World Water Assessment Programme, Side Publications Series n.4, UNESCO, Paris.

- FAO, 2014. The Water–Energy–Food Nexus: A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- FIESP, 2009. Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.
- GAMBOA, G., 2011. "Assessing the sustainability of the metabolic patterns of Mayan-Q'eqchi' peasant households: the Polochic Valley, Guatemala". Latin American and Caribbean Environmental Economics Program.
- GARCILASSO, V.P., 2014. Análise entre processos e matéria primas para a produção de biodiesel. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Energia. USP.
- GEORGESCU-ROEGEN, N., 1971. The Entropy Law and the Economic Process, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- GEORGESCU-ROEGEN, N., 1976. Energy and the Economic Myth: Institutional and Analytical Economic Essays, Pergamon Press, New York, NY.
- GIAMPIETRO M, MAYUMI K., 2000a. Multiple-Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism: Introducing the Approach. *Population and the Environment* 22.2:109-153.
- GIAMPIETRO M, MAYUMI K., 2000b. Multiple-Scale Integrated Assessments of Societal Metabolism: Integrating Biophysical and Economic Representations Across Scales. *Population and the Environment* 22.2:155-210.
- GIAMPIETRO, M. AND MAYUMI, K. 2009 The Biofuel Delusion: The fallacy of large scale agro-biofuels production. Earthscan Research Edition, London.
- GIAMPIETRO, M., 2003. Multi-scale integrated analysis of agroecosystems (2004). CRC Press.
- GIAMPIETRO, M., 2014. Resource Accounting for Sustainability Assessment. The nexus between energy, food, water and land use. Routledge, New York.
- GIAMPIETRO, M., 2016. Multi-scale relational analysis of the metabolic pattern of energy systems. Dissemination Seminar – October 11th, 2016.
- GIAMPIETRO, M., ASPINALL, R.J., BUKKENS, S.G.F., BENALCAZAR, J.C., DIAZ-MAURIN, F., FLAMMINI, A., GOMIERO, T., KOVACIC, Z., MADRID, C., RAMOS-MARTÍN, J., SERRANO-TOVAR, T., 2013. An Innovative Accounting Framework for the Food-Energy-Water Nexus - Application of the MuSIASEM approach to three case studies. Environment and Natural Resources Working Paper No.56 – FAO, Rome.
- GIAMPIETRO, M., BUKKENS, S., 2015. Analogy between Sudoku and the multi-scale integrated analysis of societal metabolism. *Ecological Informatics* 26 (2015) 18–28.
- GIAMPIETRO, M., MAYUMI, K. AND BUKKENS, S.G.F. 2001. Multiple-scale integrated assessment of societal metabolism: an analytical tool to study development and sustainability. *Environment, Development and Sustainability* 3 (4): 275-307.
- GIAMPIETRO, M., MAYUMI, K., 2009. The Biofuel Delusion: the Fallacy Behind Large-

- scale Agro-biofuels Production. Earth scan Research Edition, London, p.230.
- GOMIERO T. AND GIAMPIETRO M. 2001 Multiple-Scale Integrated Analysis of Farming Systems: The Thuong Lo Commune (Vietnamese Uplands) Case Study Population and Environment 22 (3): 315-352.
- GUILHOTO, J., 2009. Leontief e Insumo-Produto: Antecedentes, Princípios E Evolução (Leontief, Input-Output, Economic Theory). Revista de Economia e Sociologia Rural, Vol. 47, No. 2, 2009.
- HALL, C.A.S. AND KLITGAARD K.A., 2006. The need for a new, biophysical-based paradigm in economics for the second half of the age of oil. International Journal of Transdisciplinary Research Vol. 1, No. 1.
- HALL, C.A.S., 2017. Energy Return on Investment. A Unifying Principle for Biology, Economics, and Sustainability. Lecture Notes in Energy. Springer, Switzerland.
- HERNANDES, T.A, Bufon, V.B, SEABRA, J., 2013. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE), Campinas, SP, Brazil
- HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K., ALDAYA, M. M., MEKONNEN, M. M. (2009) - Water Footprint Manual: State of the Art . Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands.
- HOFF, H., 2011. Understanding the Nexus: Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Howells, M., Hermann, S., Welsch, M., Bazilian, M., Segerström, R., Alfstad, R., Gielen, D., Rogner, H., Fischer, G., van Velthuis, H., Wiberg, D., Young, C., Roehrl, A., Mueller, A., Steduto, P., Ramma, I., 2013. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. Nat. Clim. Change 3, 621–626.
- IBGE, 2016. Matriz de insumo-produto: Brasil: 2010/IBGE, Coordenação de Contas Nacionais. - Rio de Janeiro.
- IBGE, 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).
- ISO 14040, 2006. Environmental management – life cycle assessment – principles and framework. ISO, International Organization for Standardization.
- ISO 14044, 2006. Environmental management – life cycle assessment – Requirements and Guidelines. ISO 14044:2006, International Organization for Standardization. 2006.
- JEVONS, W. S., 1865. The Coal Question (reprint of the third 1906 edition), Augustus M. Kelley, New York, NY.
- JEVONS, W.S., 1879. A teoria da economia política. Segunda edição. In: Editora Nova Cultural Ltda. Copyright desta edição 1996, Círculo do Livro Ltda.
- KING, C., WEBBER, M., 2008. Water Intensity of Transportation. Environ. Sci. Technol.,

- 2008, 42 (21), pp 7866–7872. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/es800367m>. (acesso em novembro/2017).
- Lazzarini, C., Santos, A., Saramago, S., 2010. Modelo de otimização do transporte de cana-de-açúcar das frentes de corte para usinas. VI Congresso nacional de engenharia mecânica. 18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brasil.
- LENZEN, M., 2001, “Errors in Conventional and Input-Output-based Life-Cycle Inventories”, *Journal of Industrial Ecology*, v. 4, pp. 127–148.
- LENZEN, M., 2006. Structural path analysis of ecosystem networks. *Ecological Modelling* (334–342).
- LENZEN, M., FORAN, B., MORAN, D., 2012. The Eora MRIO: A Complete Database of Flows in the World Economy The Dummies Guide.
- LENZEN, M., MURRAY, J., 2013a. Building EORA: a global multi-region input–output database at high country and sector resolution. *Economic Systems Research*, 2013. Vol. 25, No. 1, 20–49.
- LENZEN, M., MURRAY, J., 2013b. The sustainability practitioner’s guide to multi-regional input output analysis. First published in 2013 in Champaign, Illinois, USA by Common Ground Publishing LLC as part of the On Sustainability Book Series.
- MACEDO, I.C., LEAL, M.R., DA SILVA, J.E., 2004. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo. Abril de 2004. 19pp+anexos.
- MACEDO, I.C., SEABRA, J., SILVA, J.E., 2008. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass Bioenerg* 32:582–595 (2008).
- MACHADO, G. V., 2002. Meio Ambiente e Comércio Exterior: Impactos da Especialização Comercial Brasileira sobre o Uso de Energia e as Emissões de Carbono do País [Rio de Janeiro], 184 p. COPPE/UFRJ, Tese de Doutorado em Planejamento Energético.
- MADRID-LOPEZ C. AND GIAMPIETRO M. 2015 The Water Metabolism of Socio-Ecological Systems Reflections and a Conceptual Framework *Journal of Industrial Ecology* 19(5): 853-865.
- MADRID-LOPEZ C., CABELLO V. AND GIAMPIETRO M. 2013. Water-use sustainability in socio-ecological systems: A multi-scale integrated approach. *BioScience* 63 (1): 14-24.
- MAROUN, C., 2014. Sustainability of the ethanol expansion in Brazil from a water-energy-land perspective. Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE. Tese (doutorado) Programa de Planejamento Energético.
- MARTINEZ-ALIER, J., 2015. Economia Ecológica. *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*, ICTA - Universitat Autònoma de Barcelona.
- MAYUMI, K., 2001. The origins of ecological economics: the bioeconomics of Georgescu-Roegen. Disponível em:



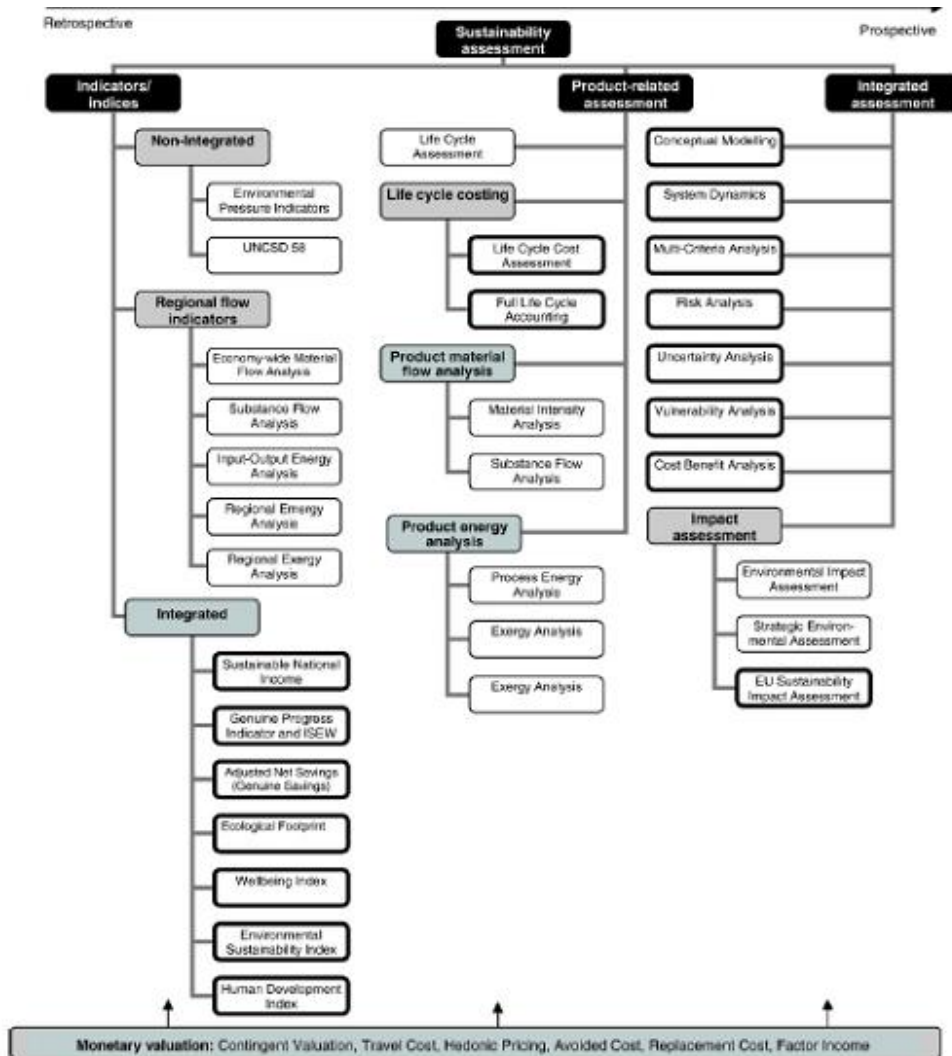
- [http://library.uniteddiversity.coop/Measuring\\_Progress\\_and\\_Eco\\_Footprinting/The\\_Origins\\_of\\_Ecological\\_Economics-The\\_Bioeconomics\\_of\\_Georgescu-Roegen.pdf](http://library.uniteddiversity.coop/Measuring_Progress_and_Eco_Footprinting/The_Origins_of_Ecological_Economics-The_Bioeconomics_of_Georgescu-Roegen.pdf).
- MAYUMI, K., Gowdy, J., (eds), 1999. Bioeconomics and Sustainability. Essays in Honor of Nicholas Georgescu-Roegen, Chentelham, Edward Elgar.
- MAYUMI, Kozo; Giampietro, Mario (2014). "Proposing a general energy accounting scheme with indicators for responsible development: Beyond monism". Ecological Indicators. Integrated Ecological Indicators for Sustainable Urban Ecosystem Evaluation and Management. 47: 50–66. doi:10.1016/j.ecolind.2014.06.033.
- Meurer, A., Lobo, D., 2015. Caracterização da logística do sistema agroindustrial (sag) da cana-de-açúcar no centro-oeste do Brasil. Economia e Gestão, Belo Horizonte, v. 15, n. 39, Abr./Jun. 2015.
- MILLER, R., BLAIR, P., 1985. Input-output analysis: foundations and extensions. Englewood Cliffs. New Jersey, Prentice-Hall.
- MME, 2015. Boletim de exploração e produção de petróleo e gás natural. Edição 44 - dezembro-2015. Disponível em: [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br).
- MONTORO FILHO, A.F., 1994. Contabilidade social: Uma introdução à macroeconomia. 2ª edição. São Paulo: Atlas.
- MTPA, 2017. Anuário Estatístico de Transportes 2010-2016. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Disponível em: <http://www.transportes.gov.br/>.
- NESS, B., URBEL-PIRSALUA, E., ANDERBERGD, S., OLSSONA, L., 2006. Categorising tools for sustainability assessment. Ecological economics 498–508.
- ODUM, H. T., 1971. Environment, Power and Society, Wiley-Interscience, New York, NY.
- OLIVEIRA, E., PICHINELLI, B.C., 2013. Visão Geral do “Manual de Conservação e Reúso de Água na Agroindústria Sucroenergética”. Disciplina: Reúso das Águas. Universidade Estadual Paulista- Faculdade de Engenharia de Bauru. Programa: Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.
- PFENNINGER, S., HAWKES, A., KEIRSTEAD, J., 2014. Energy systems modeling for twenty- first century energy challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- PNAD/IBGE, 2012. Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílio. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).
- POMBO, F., 2011. Gestão da demanda de água na indústria de refino de petróleo: desafios e oportunidades de racionalização. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético.
- RAMOS-MARTIN J., CAÑELLA-BOLTA S., GIAMPIETRO M., GAMBOA G. 2009 Catalonia's energy metabolism: using the MuSIASEM approach at different scales Energy Policy 37: 4658-4671.
- ROJAS, S. P., 2012. Contribuição do Enfoque de Ciclo de Vida da Ecologia Industrial na Economia do Meio Ambiente. Estudo de Caso: Etanol Derivado de Bagaço da Cana-de-

- Açúcar. Brasília, 183 p. Tese de Doutorado. Departamento de Economia. Universidade de Brasília, Brasília.
- ROSSETO, R., 2004. A cultura da cana, da degradação a` conservação (Sugarcane culture, from degradation to conservation). Visão Agrícola, ESALQ—USP.
- SANDRONI, P., 1999. Novíssimo dicionário de economia. Editora Best Seller, São Paulo.
- SCHEIDEL A., FARRELL K.N., 2015 Small-scale cooperative banking and the production of capital: Reflecting on the role of institutional agreements in supporting rural livelihood in Kampot, Cambodia *Ecological Economics* 119: 230-240.
- SCHEIDEL A., FARRELL K.N., RAMOS-MARTIN J., GIAMPIETRO M., MAYUMI K. 2014 *Environment Development Sustainability* 16:823–840.
- SCHEIDEL, A.; GIAMPIETRO, M.; RAMOS-MARTIN, J., 2013. Self-sufficiency or surplus: Conflicting local and national rural development goals in Cambodia. *Land Use Policy* 34 (2013) 342– 352.
- SCHIPPER, L., JIYONG, E., THOMPSON, L., 2012. We keep on truckin’: Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries. *Energy Policy*.
- SEABRA, J; MACEDO, IC; CHUM, H.; SARTO, C., 2011. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 5:519–532 (2011).
- SERRANO-TOVAR T. AND GIAMPIETRO M. 2014. Multi-scale integrated analysis of rural Laos: Studying metabolic patterns of land uses across different levels and scales. *Land Use Policy* 36: 155-170.
- SILVA, S., 2012. Avaliação do ciclo de vida do etanol combustível: uma análise econômica, social e ambiental. Dissertação Mestrado. Pós-Graduação em Economia Regional da Universidade Estadual de Londrina.
- SMIL, V., 2008. *Energy in Nature and Society: general energetics of complex systems.* Cambridge, MA, The MIT Press.
- SOARES, LHB; ALVES, BJR; URQUIAGA, S;BODDEY, RM, 2009. Mitigação das Emissões de Gases Efeito Estufa pelo Uso de Etanol da Cana-de-Açúcar Produzido no Brasil. Circular Técnica 27, Embrapa, Seropédica, RJ.
- SORMAN, ALEVGUL H.; GIAMPIETRO, MARIO (2013). "The energetic metabolism of societies and the degrowth paradigm: analyzing biophysical constraints and realities". *Journal of Cleaner Production*. Degrowth: From Theory to Practice. 38: 80–93. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.059.
- SZKLO, A., SCHAEFFER, R., 2007. Fuel specification, energy consumption and CO2 emission in oil refineries. *Energy* 32 (2007) 1075–1092.
- TEEIC, 2017. Tribal Energy and Environmental Information Clearinghouse. Office of Indian Energy and Economic Development. Disponível em: <https://teeic.indianaffairs.gov/index.htm>.

- Transpetro, 2017. Petrobras Transporte S.A. – Transpetro. Disponível em: [www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br).
- UDOP/IEA, 2016. Manual de Custos e Indicadores do Setor da Bioenergia. União dos produtores de bioenergia UDOP/IEA - Instituto de economia agrícola do Estado de São Paulo.
- MARZULLO, R., 2007. Análise de ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, visando a produção de biodiesel. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ÚNICA, 2017. A bioeletricidade da cana em números – janeiro de 2017.
- WELSCH, M., HERMANN, S., HOWELL, S. A., ROGNER, H., *et al.*, 2014. “Adding value with CLEWS – Modelling the energy system and its interdependencies for Mauritius”. *Applied Energy* v. 113, pp. 1434-1445
- Worrell E, Galitsky C., 2004. Profile of the petroleum refining industry in California. Energy Analysis Department/Environmental Energy Technologies Department. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Van Beeck, N. M. J. P. (1999). Classification of Energy Models. (FEW Research Memorandum; Vol. 777). Tilburg: Operations research.
- XIAO, LISHAN; LIN, TAO; CHEN, SHAOHUA; ZHANG, GUOQIN; YE, ZHILONG; YU, ZHAOWU, 2015. "Characterizing Urban Household Waste Generation and Metabolism Considering Community Stratification in a Rapid Urbanizing Area of China". *PLoS ONE*. 10 (12): e0145405. PMC 4687053 Freely accessible. PMID 26690056. doi:10.1371/journal.pone.0145405.
- YANGSIYU LU, Yong Geng, Yiyang Qian, Wenyi Han, Will McDowall, Raimund Bleischwitz, 2016, Changes of human time and land use pattern in one mega city's urban metabolism: A multi-scale integrated analysis of Shanghai, *Journal of Cleaner Production*, Available online 2 June 2016.
- YONG GENG, YE LIU, DAN LIU, HENGXIN ZHAO, BING XUE, 2011. Regional societal and ecosystem metabolism analysis in China: A multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM) approach. *Energy* 36: 4799-4808.
- ZHANG, B., CHEN, Z.M., XIA, X.H., XU, X.Y., CHEN, Y.B., 2013. The impact of domestic trade on China's regional energy uses: A multi-regional input-output modeling. *Energy Policy* 63(2013)1169–1181.

## 8 Anexos

Figura 29: Ferramentas de avaliação da sustentabilidade.



Fonte: Ness et al, 2006.

**Tabela 35: Produção de Água na produção de petróleo offshore no Brasil, de 2007 a 2013**

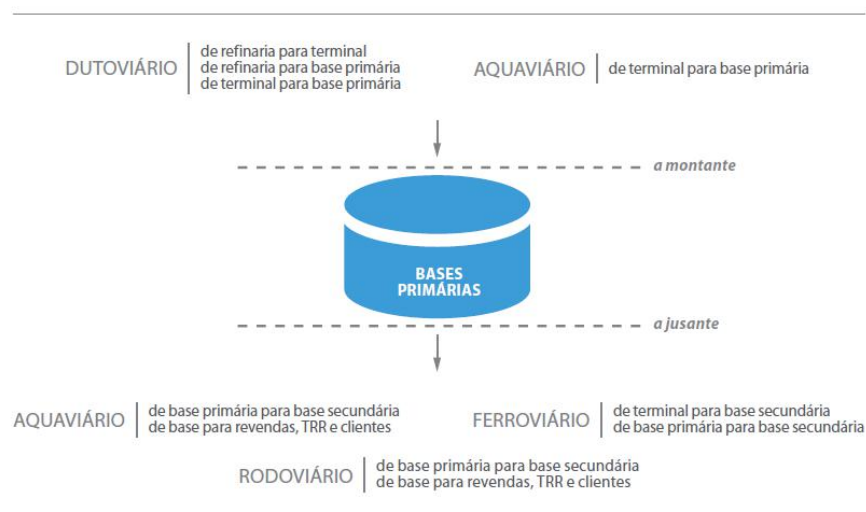
Anos	Nº de campos em produção	Produção de Petróleo (m³)	Produção de Água (m³)	Razão água:óleo
2007	72	90.325.811,72	55.616.116,24	0,62
2008	72	94.966.052,11	64.840.609,47	0,68
2009	77	102.772.060,94	72.669.901,67	0,71
2010	84	108.744.098,48	79.797.357,58	0,73
2011	88	111.613.472,60	78.894.063,37	0,71
2012	92	109.440.699,13	85.882.879,79	0,78
2013	81	107.152.244,15	94.924.064,52	0,89
<b>Média</b>	<b>81</b>	<b>103.573.491,30</b>	<b>76.089.285,66</b>	<b>0,73</b>

**Fonte: ANP (2014) *apud in* Gomes (2014)**

**Tabela 36: Estimativa fluxo água (salgada e impura) – etapa exploração e produção de petróleo (mil m³)**

(mil m³)	Produção Petróleo	Produção água	Descartada	Utilizada
<b>Total</b>	<b>141.446</b>	<b>103.255</b>	<b>83.238</b>	<b>20.018</b>
Onshore	9.280	6.774	677	6.097
Offshore	132.166	96.481	82.560	13.921

**Fonte: Elaboração própria a partir de ANP (2014) *apud in* Gomes (2014); ANP (2016), (GWPC, 2012)**



**Figura 30: Modos de transporte a montante e a jusante das bases.**

**Fonte: ANP, 2015**

**Tabela 37: Empregos no cultivo de soja – 1994/2010**

Ano	Estabelecimentos no Cultivo de Soja <sup>1</sup> (unidades)	Estabelecimentos da Agricultura, Pecuária, Silvicultura e Exploração Florestal <sup>2</sup> (unidades)	Participação dos Estabelecimentos na Cultura da Soja no Total do Setor (%)	Empregos no Cultivo de Soja (unidades)	Empregos da Agricultura, Pecuária, Silvicultura e Exploração Florestal (unidades)	Participação dos Empregos na Cultura da Soja no Total do Setor (%)
1994	2.023 <sup>3</sup>	185.096	1,09	6.126	1.029.761	0,59
1995	2.033	208.697	0,97	5.405	1.033.867	0,52
1996	1.895	220.949	0,86	5.370	1.014.657	0,53
1997	1.972	229.531	0,86	6.026	1.019.121	0,59
1998	1.997	237.697	0,84	6.531	1.028.258	0,64
1999	2.186	245.591	0,89	8.011	1.052.493	0,76
2000	3.389	255.415	1,33	11.660	1.094.489	1,07
2001	3.947	262.458	1,50	14.382	1.106.555	1,30
2002	4.861	274.456	1,77	18.650	1.159.334	1,61
2003	9.043	284.301	3,18	36.925	1.239.539	2,98
2004	11.112	297.800	3,73	47.469	1.350.228	3,52
2005	11.942	304.004	3,93	48.248	1.354.947	3,56
2006	19.061	309.508	6,16	70.457	1.397.117	5,04
2007	18.729	310.363	6,03	75.171	1.424.853	5,28
2008	19.183	316.113	6,07	80.970	1.454.145	5,57
2009	19.654	319.172	6,16	84.467	1.455.643	5,80
2010	20.527	323.756	6,34	89.351	1.445.433	6,18

Fonte: MTE (2013). (1) CNAE 1.0, Classe – 0115-5 Cultivo de Soja; (2) CNAE 1.0, Seção A – Agricultura, Pecuária, Silvicultura e Exploração Florestal; (3) Em 1994, não há diferenciação entre estabelecimentos com RAIS Negativa ou não.

**Fonte: MTE (2013) apud in Anholetto e Massuquetti (2014)**

**Tabela 38: Produção de biodiesel por unidade produtora.**

Unidade produtora	Capacidade instalada	Capacidade instalada	Produção
	m³/dia	m³/ano	m³/ano
<b>Total</b>	<b>20.366,1</b>	<b>7.331.799,6</b>	<b>3.937.281,0</b>
Abdiesel	6,0	2.160,0	
ADM	1.352,0	486.720,0	279.952,0
ADM	510,0	183.600,0	92.531,0
Amazonbio	90,0	32.400,0	17.692,0
Barralcooil	190,5	68.565,6	
Bianchini	900,0	324.000,0	426.342,0
Big frango	6,0	2.160,0	
Binatural	450,0	162.000,0	73.821,0
Bio Brazilian	98,0	35.280,0	0,0
Bio Óleo	150,0	54.000,0	6.193,0
Bio Petro	194,4	69.998,4	0,0
Bio Vida	18,0	6.480,0	887,0
Biocamp	300,0	108.000,0	99.659,0
Biocapital	400,0	144.000,0	1.821,0
Biopar	120,0	43.200,0	2.300,0
Biopar	338,0	121.680,0	53.197,0
Biotins	81,0	29.160,0	
Bocchi	300,0	108.000,0	33.724,0
Bsbios	600,0	216.000,0	
Bsbios	580,0	208.800,0	0,0
Bunge	413,8	148.964,4	211.932,0
Camera	650,0	234.000,0	0,0
Caramuru	625,0	225.000,0	125.266,0
Caramuru	625,0	225.000,0	161.090,0
Cargill	700,0	252.000,0	268.889,0
Cesbra	166,7	60.012,0	27.553,0
Cooperfelig	10,0	3.600,0	278,0
Delta	300,0	108.000,0	115.425,0
Fertibom	333,3	119.988,0	
Fiagril	563,0	202.680,0	253.173,0
Fuga Couros	300,0	108.000,0	100.793,0
Granol	500,0	180.000,0	241.709,0
Granol	1.033,0	371.880,0	
Granol	933,3	335.998,8	305.159,0
Jataí	50,0	18.000,0	0,0
JBS	560,2	201.682,8	125.480,0
Minerva	45,0	16.200,0	0,0
Noble	600,0	216.000,0	
Oleoplan	1.050,0	378.000,0	145.520,0
Oleoplan Nordeste	360,0	129.600,0	
Oifar	600,0	216.000,0	235.359,0
Orlândia	367,0	132.120,0	
Petrobras Biocombustíveis	422,7	152.182,8	119.138,0
Petrobras Biocombustíveis	301,7	108.615,6	155.012,0
Petrobras Biocombustíveis	56,0	20.160,0	
Petrobras Biocombustíveis	603,4	217.231,2	155.012,0
Potencial	553,0	199.080,0	
Rondobio	10,0	3.600,0	0,0
SP Bio	200,0	72.000,0	22.361,0
SSIL	50,0	18.000,0	0,0
Tauá	100,0	36.000,0	0,0
Transportadora Caiense	100,0	36.000,0	6.579,0
Três Tentos	500,0	180.000,0	73.434,0

**Fonte: Elaboração própria a partir de ANP (2016) e EPE webmap (2017)**

**Tabela 39: Consolidado capacidade produtiva (produção potencial)**

PRODUÇÃO	Petróleo	Mil t		Mil t		Mil t
		125.038	Cana de Açúcar	634.767	Soja	96.994
NÍVEL n-3	ONSHORE	8.203	PLANTIO		PLANTIO	-
Nível n-4	OFFSHORE	116.835	COLHEITA	634.767	COLHEITA	96.994
			Mecânica	485.377	Mecânica	96.994
			Manual	149.390	Manual	-
TRANSPORTE #1		Mil t		Mil t		Mil t
	Petróleo	98.734	Cana de Açúcar	627.148	Soja	40.556
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	8.647	DUTOVIÁRIO	-	DUTOVIÁRIO	-
	HIDROVIÁRIO	90.087	HIDROVIÁRIO	-	HIDROVIÁRIO	-
	RODOVIÁRIO	-	RODOVIÁRIO	627.148	RODOVIÁRIO	40.556
	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO	-
TRANSFORMAÇÃO		MIL M³		MIL M³		MIL M³
	Gasolina/Diesel	75.184	Etanol	30.249	Biodiesel	3.937
NÍVEL n-3	PEQUENA < 5mil m³	11.843	PEQUENA (< 2 milhões m³)	13.829	PEQUENA (100 mil m³)	84
	MEDIA 5-10 mil m³	45.567	MÉDIA ( 2 - 5 milhões m³)	14.502	MÉDIA (100-200 mil m³)	1.372
	GRANDE > 10 mil m³	17.774	GRANDE (> 5 milhões m³)	1.917	GRANDE (> 200 mil m³)	2.481
Nível n-4	Manguinhos (RJ)	395				
	Riograndense (RS)	519				
	Lubnor (CE)	33				
	Recap (SP)	1.940				
	Reduc (RJ)	4.801				
	Refap (RS)	7.789				
	Regap (MG)	5.919				
	Reman (AM)	1.108				
	Repar (PR)	8.591				
	Replan (SP)	17.774				
	Revap (SP)	7.871				
	Rlam (BA)	8.428				
	RPBC (SP)	6.970				
	RPCC (RN)	828				
	Rnest (PE)	2.219				
	Univen (SP)	-				
	Dax Oil (BA)	0				
TRANSPORTE #2		MIL M³		MIL M³		MIL M³
	Gasolina/Diesel	71.978	Etanol	29.729	Biodiesel	3.140
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	17.660	DUTOVIÁRIO	1.106	DUTOVIÁRIO	-
	HIDROVIÁRIO	54.319	HIDROVIÁRIO	-	HIDROVIÁRIO	-
	RODOVIÁRIO	-	RODOVIÁRIO	28.623	RODOVIÁRIO	3.140
	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO	-



**Tabela 40: Consolidado fundo e fluxos da capacidade produtiva–sistema energético petróleo (nível n)**

NÍVEL n	<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO</b>					
	<b>PETRÓLEO/BIOMAS</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	Gasolina/Diesel/ Etanol/Biodiesel	910,17	148,56	1.339.110,55	45.442,53	1.095.707,38
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>					
	<b>PETRÓLEO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	GASOLINA E DIESEL	488,98	2,38	91.285,34	2.737,89	237.631,10
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>					
	<b>PRODUÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		178,03	0,03	-	2.725,90	125.743,04
NÍVEL n-3	ONSHORE	18,04	0,00	-	694,60	35.084,95
Nível n-4	OFFSHORE	159,99	0,03	-	2.031,30	90.658,08
	<b>TRANSPORTE #1</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		30,58	0,00	-	-	6.275,12
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	0,00	-	-	549,56
	HIDROVIÁRIO	30,58	-	-	-	5.725,56
	RODOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		280,29	2,35	91.285,34	11,99	101.038,34
NÍVEL n-3	PEQUENA < 5mil m³	56,47	0,41	22.568,41	5,87	15.915,23
	MEDIA 5-10 mil m³	168,08	1,50	52.918,19	5,21	61.236,94
	GRANDE > 10 mil m³	55,74	0,44	15.798,73	0,91	23.886,17
Nível n-4	Manguinhos (RJ)	0,95	-	313,95	0,01	530,20
	Riograndense (RS)	1,39	0,01	457,02	0,04	697,29
	Lubnor (CE)	1,20	0,01	394,44	0,04	43,99
	Recap (SP)	5,73	0,05	2.046,82	0,37	2.607,03
	Reduc (RJ)	28,38	0,16	13.871,87	1,30	6.451,60
	Refap (RS)	24,83	0,19	8.159,03	0,58	10.466,86
	Regap (MG)	21,56	0,22	9.388,23	1,25	7.954,14
	Reman (AM)	4,97	0,05	918,23	0,98	1.489,60
	Repar (PR)	28,04	0,23	6.565,83	1,00	11.544,92
	Replan (SP)	55,74	0,44	15.798,73	0,91	23.886,17
	Revap (SP)	34,55	0,30	7.947,62	1,03	10.577,22
	Rlam (BA)	36,85	0,35	10.442,78	0,65	11.326,46
	RPBC (SP)	22,24	0,22	10.414,70	0,70	9.367,34
	RPCC (RN)	4,79	0,05	1.578,71	2,50	1.113,39
	Rnest (PE)	8,95	0,07	2.946,78	0,62	2.982,11
	Univen (SP)	-	-	-	-	-
	Dax Oil (BA)	0,12	0,00	40,60	0,01	0,02
	<b>TRANSPORTE #2</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		0,07	0,00	-	-	4.574,62
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	0,00	-	-	1.122,37
	HIDROVIÁRIO	0,07	-	-	-	3.452,25
	RODOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Tabela 41: Consolidado fundo e fluxos da capacidade produtiva – sistema energético cana de açúcar (nível n)**

<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO</b>					
<b>PETRÓLEO/BIOMASSA</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
Gasolina/Diesel/ Etanol/Biodiesel	910,17	148,56	1.339.110,55	45.442,53	1.095.707,38
<b>BIOMASSA (cana de açúcar)</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
ETANOL	110,85	122,31	1.160.224,25	10.610,70	675.083,07
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	78,05	-	-	10.605,98	178.714,38
PLANTIO	42,59	-	-	10.605,98	7.685,50
COLHEITA	35,46	-	-	9.004,48	171.028,88
Mecânica	35,46	-	-	6.885,31	8.526,34
Manual	-	-	-	2.119,17	162.502,55
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	18,17	-	-	-	111.493,02
DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
RODOVIÁRIO	18,17	-	-	-	111.493,02
FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	-	122,31	1.160.224,25	4,72	369.940,99
PEQUENA (< 2 milhões m³)	-	55,92	530.436,84	1,18	169.131,38
MÉDIA ( 2 - 5 milhões m³)	-	58,64	556.246,49	3,07	177.360,86
GRANDE (> 5 milhões m³)	-	7,75	73.540,92	0,47	23.448,74
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	14,63	0,00	-	-	14.934,69
DUTOVIÁRIO	-	0,00	-	-	70,30
HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
RODOVIÁRIO	14,63	-	-	-	14.864,39
FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Tabela 42: Consolidado fundo e fluxos da capacidade produtiva– sistema energético soja (nível n)**

<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO</b>					
<b>PETRÓLEO/BIOMASSA</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
Gasolina/Diesel/ Etanol/Biodiesel	910,17	148,56	1.339.110,55	45.442,53	1.095.707,38
<b>BIOMASSA (SOJA)</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
BIODIESEL	310,35	23,87	87.600,96	32.093,94	182.993,20
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	80,51	-	-	32.092,90	164.102,69
PLANTIO	33,81	-	-	32.092,90	-
COLHEITA	46,70	-	-	31.941,94	-
Mecânica	46,70	-	-	31.941,94	-
Manual	-	-	-	-	-
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	73,70	-	-	-	14.419,91
DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
RODOVIÁRIO	73,70	-	-	-	14.419,91
FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	154,60	23,87	87.600,96	1,04	2.900,84
PEQUENA (100 mil m³)	3,29	0,51	1.865,43	0,12	61,77
MÉDIA (100-200 mil m³)	53,88	8,32	30.530,13	0,38	1.010,98
GRANDE (> 200 mil m³)	97,43	15,04	55.205,40	0,54	1.828,08
	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	1,54	-	-	-	1.569,76
DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
RODOVIÁRIO	1,54	-	-	-	1.569,76
FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Tabela 43: Consolidado Produção Efetiva (exclusivo combustíveis rodoviários)**

PROCESSOS					
PRODUÇÃO		Mil t		Mil t	
	Petróleo	62.113	Cana de Açúcar	361.001	Soja
NÍVEL n-3	ONSHORE	4.075	PLANTIO		PLANTIO
Nível n-4	OFFSHORE	58.038	COLHEITA	361.001	COLHEITA
			Mecânica	276.041	Mecânica
			Manual	84.960	Manual
TRANSPORTE #1		Mil t		Mil t	
	Petróleo	62.113	Cana de Açúcar	361.001	Soja
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	5.440	DUTOVIÁRIO	-	DUTOVIÁRIO
	HIDROVIÁRIO	56.673	HIDROVIÁRIO	-	HIDROVIÁRIO
	RODOVIÁRIO	-	RODOVIÁRIO	361.001	RODOVIÁRIO
	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO
TRANSFORMAÇÃO		MIL M³		MIL M³	
	Gasolina/Diesel	71.978	Etanol	30.249	Biodiesel
NÍVEL n-3	PEQUENA < 5mil m³	11.338	PEQUENA (< 2 milhões m³)	13.829	PEQUENA (100 mil m³)
	MEDIA 5-10 mil m³	43.624	MÉDIA ( 2 - 5 milhões m³)	14.502	MÉDIA (100-200 mil m³)
	GRANDE > 10 mil m³	17.016	GRANDE (> 5 milhões m³)	1.917	GRANDE (> 200 mil m³)
Nível n-4	Manguinhos (RJ)	378			
	Riograndense (RS)	497			
	Lubnor (CE)	31			
	Recap (SP)	1.857			
	Reduc (RJ)	4.596			
	Refap (RS)	7.456			
	Regap (MG)	5.666			
	Reman (AM)	1.061			
	Repar (PR)	8.224			
	Replan (SP)	17.016			
	Revap (SP)	7.535			
	Rlam (BA)	8.069			
	RPBC (SP)	6.673			
	RPCC (RN)	793			
	Rnest (PE)	2.124			
	Univen (SP)	-			
	Dax Oil (BA)	0			
TRANSPORTE #2		MIL M³		MIL M³	
	Gasolina/Diesel	71.978	Etanol	29.729	Biodiesel
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	17.660	DUTOVIÁRIO	1.106	DUTOVIÁRIO
	HIDROVIÁRIO	54.319	HIDROVIÁRIO	-	HIDROVIÁRIO
	RODOVIÁRIO	-	RODOVIÁRIO	28.623	RODOVIÁRIO
	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO	-	FERROVIÁRIO

**Tabela 44: Consolidado fundo e fluxos da Produção Efetiva– combustíveis rodoviários gasolina e disel (nível n)**

NÍVEL n	<b>COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO</b>					
	<b>PETRÓLEO/BIOMASSA</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	Gasolina/Diesel/ Etanol/Biodiesel	523	96	810.317	10.068	550.006
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>					
	<b>PETRÓLEO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	GASOLINA E DIESEL	276	1	54.864	1.361	131.712
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>					
	<b>PRODUÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		88	0	-	1.354	62.463
NÍVEL n-3	ONSHORE	9	0	-	345	17.429
	OFFSHORE	79	0	-	1.009	45.035
Nível n-4						
	<b>TRANSPORTE #1</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		19	0	-	-	3.948
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	0	-	-	346
	HIDROVIÁRIO	19	-	-	-	3.602
	RODOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		168	1	54.864	7	60.726
NÍVEL n-3	PEQUENA < 5mil m³	34	0	13.564	4	9.565
	MEDIA 5-10 mil m³	101	1	31.805	3	36.805
	GRANDE > 10 mil m³	34	0	9.495	1	14.356
Nível n-4	Manguinhos (RJ)	1	-	189	0	319
	Riograndense (RS)	1	0	275	0	419
	Lubnor (CE)	1	0	237	0	26
	Recap (SP)	3	0	1.230	0	1.567
	Reduc (RJ)	17	0	8.337	1	3.878
	Refap (RS)	15	0	4.904	0	6.291
	Regap (MG)	13	0	5.643	1	4.781
	Reman (AM)	3	0	552	1	895
	Repar (PR)	17	0	3.946	1	6.939
	Replan (SP)	34	0	9.495	1	14.356
	Revap (SP)	21	0	4.777	1	6.357
	Rlam (BA)	22	0	6.276	0	6.807
	RPBC (SP)	13	0	6.259	0	5.630
	RPCC (RN)	3	0	949	2	669
	Rnest (PE)	5	0	1.771	0	1.792
	Univen (SP)	-	-	-	-	-
	Dax Oil (BA)	0	0	24	0	0
	<b>TRANSPORTE #2</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		0	0	-	-	4.575
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	0	-	-	1.122
	HIDROVIÁRIO	0	-	-	-	3.452
	RODOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Tabela 45: Consolidado fundo e fluxos da Produção Efetiva– combustíveis rodoviários etanol anidro e hidratado (nível n)**

NÍVEL n		COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO					
		PETRÓLEO/BIOMASSA	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		Gasolina/Diesel/ Etanol/Biodiesel	523	96	810.317	10.068	550.006
NÍVEL n-1		SISTEMA ENERGÉTICO					
		BIOMASSA (cana de açúcar)	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		ETANOL	69	70	667.852	6.034	397.292
NÍVEL n-2		PROCESSOS					
		PRODUÇÃO					
			PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			44	-	-	6.032	101.637
NÍVEL n-3		PLANTIO	24	-	-	6.032	4.371
		COLHEITA	20	-	-	5.121	97.266
Nível n-4		Mecânica	20	-	-	3.916	4.849
		Manual	-	-	-	1.205	92.417
		TRANSPORTE #1					
			PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			10	-	-	-	64.178
NÍVEL n-3		DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
		HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
		RODOVIÁRIO	10	-	-	-	64.178
		FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
		TRANSFORMAÇÃO					
			PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			-	70	667.852	3	216.542
NÍVEL n-3		PEQUENA (< 2 milhões m³)	-	32	305.332	1	99.000
		MÉDIA ( 2 - 5 milhões m³)	-	34	320.188	2	103.817
		GRANDE (> 5 milhões m³)	-	4	42.332	0	13.726
		TRANSPORTE #2					
			PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
			15	0	-	-	14.935
NÍVEL n-3		DUTOVIÁRIO	-	0	-	-	70
		HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
		RODOVIÁRIO	15	-	-	-	14.864
		FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-

**Tabela 46: Consolidado fundo e fluxos da Produção Efetiva– combustível rodoviário biodiesel (nível n)**

NÍVEL n	COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS TRANSPORTE RODOVIÁRIO					
	<b>PETRÓLEO/BIOMASSA</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	Gasolina/Diesel/ Etanol/Biodiesel	523	96	810.317	10.068	550.006
NÍVEL n-1	<b>SISTEMA ENERGÉTICO</b>					
	<b>BIOMASSA (SOJA)</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
	BODIESEL	178	24	87.601	2.673	21.002
NÍVEL n-2	<b>PROCESSOS</b>					
	<b>PRODUÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		7	-	-	2.672	13.661
NÍVEL n-3	PLANTIO	3	-	-	2.672	-
	COLHEITA	4	-	-	2.659	-
Nível n-4	Mecânica	4	-	-	2.659	-
	Manual	-	-	-	-	-
	<b>TRANSPORTE #1</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		15	-	-	-	2.871
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	RODOVIÁRIO	15	-	-	-	2.871
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	<b>TRANSFORMAÇÃO</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		155	24	87.601	1	2.901
NÍVEL n-3	PEQUENA (100 mil m³)	3	1	1.865	0	62
	MÉDIA (100-200 mil m³)	54	8	30.530	0	1.011
	GRANDE (> 200 mil m³)	97	15	55.205	1	1.828
	<b>TRANSPORTE #2</b>	PJ-therm	PJ-electr	W	LU	HA
		2	-	-	-	1.570
NÍVEL n-3	DUTOVIÁRIO	-	-	-	-	-
	HIDROVIÁRIO	-	-	-	-	-
	RODOVIÁRIO	2	-	-	-	1.570
	FERROVIÁRIO	-	-	-	-	-